



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

A.a. 2025/2026

Analisi e messa in opera di sistemi di posizionamento basati su piattaforma di Stewart nell'esperimento NUMEN

Relatori:

Carlo De Benedictis

Daniela Calvo

Diego Sartirana

Maria Paterna

Candidato:

Pietro Casasanta

Indice

1	Esperimento NUMEN	6
1.1	L'esperimento NUMEN	6
1.2	Modello standard della fisica delle particelle	7
1.3	Doppio decadimento beta	7
1.4	L'obiettivo dell'esperimento NUMEN	9
1.5	Organizzazione dell'esperimento NUMEN	9
1.5.1	Il ciclotrone	9
1.5.2	Lo spettrometro MAGNEX	10
1.5.3	Rivelatore G-NUMEN	16
2	G-NUMEN	17
2.1	Descrizione	17
2.2	I supporti dei rivelatori: i gusci	18
2.2.1	Guscio ottante sinistro	21
2.2.2	Guscio ottante destro	23
2.3	Rivelatori gamma	23
2.3.1	Montaggio rivelatori gamma	25
2.3.2	Misurazioni sui rivelatori gamma	27
2.4	Sistemi di movimentazione e posizionamento dei gusci	29
2.4.1	Sistema di movimentazione	30
2.5	Sistema ottante sinistro	33
2.6	Sistema ottante destro	34
2.7	Controllo automatico attuatori	34
3	Piattaforma di Stewart	36
3.1	Descrizione	36
3.2	Sistemi di posizionamento degli ottanti	36
3.2.1	Base inferiore	38
3.2.2	Guide lineari	39
3.2.3	Carrelli e morsetti di serraggio	41

3.2.4	Base superiore	42
3.2.5	Viti micrometriche	43
3.2.6	Giunti sferici	47
4	Cinematica e misurazioni	48
4.1	Cinematica	48
4.2	Cinematica inversa	49
4.2.1	Approfondimento sull'orientamento della base superiore . .	51
4.2.2	Procedura analitica cinematica inversa	56
4.3	Cinematica sistema completo	59
4.3.1	Procedura analitica	60
4.3.2	Codice Matlab cinematica del sistema completo	65
5	Sistema di controllo per la movimentazione dello shell	66
5.1	Descrizione PLC	66
5.2	Manifold	67
5.3	Finecorsa	69
5.4	Regolatore di flusso con valvole di non ritorno	70
5.5	Altri elementi del sistema di controllo degli attuatori	71
5.6	Struttura sistema di controllo	72
5.7	Programma PLC	74
5.8	Verifica del funzionamento del sistema di controllo	78
6	Misurazioni e Risultati	79
6.1	Macchina di misura CMM	79
6.2	Misurazioni sulla piattaforma di Stewart	79
6.2.1	Definizione delle configurazioni delle gambe	80
6.2.2	Procedura per le misurazioni sulla piattaforma di Stewart .	80
6.2.3	Misurazioni effettuate	86
6.3	Cinematica della piattaforma di Stewart	86
6.3.1	Esempio di verifica della cinematica	87
6.3.2	Risultati	88

6.4	Riproducibilità della piattaforma di Stewart	89
6.5	Misurazioni sul sistema dell'ottante sinistro	94
6.5.1	Approfondimento su come misurare il guscio tramite CMM	94
6.5.2	Definizione sistema di riferimento	95
6.6	Ripetibilità del sistema dell'ottante sinistro	98
6.7	Caratterizzazione del guscio dell'ottante sinistro	100
6.8	Cinematica del sistema dell'ottante sinistro	102
7	Conclusioni	107
8	Appendice	111
8.1	Codici Matlab	111
8.1.1	Codice per cinematica inversa della sola piattaforma di Stewart	111
8.1.2	Codice per cinematica inversa del sistema completo dell'ottante sinistro	113
8.2	Programma PLC	115
8.3	Tabelle risultati delle prove con CMM	117
8.3.1	Cinematica della piattaforma di Stewart	117
8.3.2	Ripetibilità del sistema dell'ottante sinistro	121
8.3.3	Caratterizzazione del guscio dell'ottante sinistro	122
8.3.4	Cinematica del sistema dell'ottante sinistro	123

Introduzione

Il lavoro svolto per questa tesi riguarda l'analisi e la messa in opera di sistemi di movimentazione e posizionamento che vengono utilizzati nell'esperimento di fisica nucleare NUMEN dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), condotto presso i Laboratori Nazionali del Sud (LNS) di Catania.

L'obiettivo di NUMEN è lo studio delle reazioni nucleari di doppio scambio di carica (DCE) utilizzando fasci di ioni pesanti, al fine di ottenere informazioni sugli elementi di matrice nucleare delle DCE. Esse permettono di ottenere informazioni sul processo di doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$).

Finora l'esperimento ha utilizzato fasci di ioni a bassa intensità. Dato che si sono ottenuti buoni risultati si è deciso di sottoporre l'esperimento ad un significativo aggiornamento tecnologico per poter incrementare l'intensità dei fasci di ioni.

Ciò è stato fatto perchè le reazioni di DCE presentano una probabilità di accadimento estremamente bassa, quindi per raccogliere una statistica di dati significativa in tempi ragionevoli c'è bisogno di utilizzare fasci di ioni ad alta intensità.

Ad esempio è stato rinnovato sia il ciclotrone superconduttore K800, sia lo spettrometro MAGNEX.

L'incremento della potenza del fascio porta a dei livelli di attivazione dei materiali molto elevati nelle immediate vicinanze della camera di scattering, all'interno della quale è posizionato il bersaglio. Per questo motivo i tecnici non potranno avvicinarsi fisicamente ed è necessaria l'adozione di sistemi di movimentazione semiautomatici per la gestione del set-up sperimentale.

Dato che lo spettrometro MAGNEX ha dei limiti di risoluzione energetica, per identificare con precisione gli stati eccitati di alcuni prodotti di reazione c'è bisogno di utilizzare il sistema G-NUMEN, composto da rivelatori per raggi gamma posizionati intorno alla camera di scattering.

I rivelatori sono tenuti in posizione con dei supporti, cioè dei gusci in alluminio, ciascuno dei quali ha un sistema di movimentazione composto da attuatori cilindrici pneumatici e un sistema di posizionamento costituito da una piattaforma di Stewart,

che permette di regolare la posizione e l'orientamento dei gusci nei sei gradi di libertà.

Come attività di tesi sono stati analizzati e provati questi sistemi di movimentazione e posizionamento dei gusci presso il Laboratorio Tecnologico della sezione INFN di Torino.

In particolare è stata misurata la riproducibilità della piattaforma di Stewart ed è stata analizzata e provata la sua cinematica, realizzando modelli matematici e codici numerici di cinematica inversa.

Inoltre è stata misurata la ripetibilità del sistema integrale di movimentazione e posizionamento del guscio dell'ottante sinistro ed è stata analizzata e provata la sua cinematica.

Per ultimo è stato analizzato e messo in opera il sistema di controllo dei sistemi di movimentazione dei gusci, con l'utilizzo di un PLC.

1 Esperimento NUMEN

1.1 L'esperimento NUMEN

NUMEN è un esperimento che viene condotto ai Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) a Catania. In esso collaborano ricercatori da varie sezioni italiane dell'INFN e anche dall'estero.

Tra queste c'è anche la sezione INFN di Torino, con il laboratorio tecnologico in Strada delle Cacce, dove vengono svolte alcune delle attività che fanno parte dell'esperimento NUMEN. In particolare l'oggetto di questa tesi è l'analisi e la messa in opera di sistemi di movimentazione che vengono utilizzati nell'esperimento, svolta nella sezione INFN di Torino.



Figura 1: logo di NUMEN

L'obiettivo dell'esperimento NUMEN (NUclear Matrix Elements for Neutrinoless double beta decay) è quello di studiare le reazioni nucleari di doppio scambio di carica Hi-DCE (Heavy Ion Double Charge Exchange) tra ioni pesanti (^{20}Ne , ^{18}O) e isotopi di interesse per lo studio del doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$) [1].

Infatti DCE e doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$) presentano delle caratteristiche in comune, come per esempio gli stessi stati iniziale e finale, anche se sono mediate da interazioni differenti. È così possibile ottenere informazioni sugli elementi della matrice nucleare (NME) del $0\nu\beta\beta$ utilizzando reazioni Hi-DCE. [1].

Se il doppio decadimento beta senza neutrini dovesse essere confermato si dimostrerebbe che il neutrino è una particella di Majorana, e non di Dirac come stabilisce l'attuale Modello standard delle particelle [2, 3].

1.2 Modello standard della fisica delle particelle

Il modello standard raggruppa le particelle in due categorie: bosoni e fermioni. I bosoni hanno spin intero, invece i fermioni hanno spin semi-intero ($1/2$, $3/2$, $5/2$...) [2].

In generale ogni fermione ha una sua antiparticella, cioè una particella con la stessa massa ma numeri quantici opposti; i numeri quantici sono ad esempio la carica elettrica o il numero barionico. Ad esempio l'elettrone, che è un fermione, ha un antiparticella, il positrone, che ha la stessa massa ma carica opposta [2].

Anche i bosoni hanno le loro antiparticelle, ma ci sono alcuni bosoni la cui antiparticella è uguale alla particella. Un esempio è il fotone, che ha numeri quantici neutri (cioè uguali a 0) e quindi particella e antiparticella coincidono [2].

Per quanto riguarda il neutrino, esso è un fermione e attualmente è ignoto se la sua antiparticella, l'antineutrino, sia uguale oppure diversa dal neutrino [2]. Se fosse uguale allora il neutrino sarebbe una particella di Majorana [4].

Majorana teorizzò l'esistenza di fermioni che sono uguali alla propria antiparticella. Finora non è stata mai dimostrata la loro esistenza [4].

Tre generazioni della materia (fermioni)			
	I	II	III
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome→	u up	c charm	t top
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauonico
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elettrone	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muone	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauone
Leptoni			
			80,4 GeV ± 1 1 $W^\pm$ forza debole
			91,2 GeV 0 1 Z^0 forza debole
			0 0 1 g gluone
			0 0 1 γ fotone
			Bosoni di gauge

Figura 2: fermioni (prime 3 colonne) e bosoni (4° colonna)

(fonte: Wikimedia Commons)

1.3 Doppio decadimento beta

Per capire se il neutrino è una particella di Majorana è necessario studiare il doppio decadimento beta, un decadimento radioattivo molto raro, che è descritto

sinteticamente in questo paragrafo. In particolare è descritta la differenza tra doppio decadimento beta con neutrini e senza neutrini.

In un decadimento beta semplice un neutrone decade in un protone con emissione di un elettrone e un antineutrino [2].

Nel doppio decadimento beta, nel nucleo di un atomo avviene un decadimento di due neutroni in due protoni con l'emissione di due elettroni e due antineutrini [6].

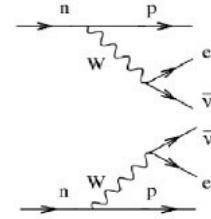


Figura 3: Doppio decadimento beta. Fonte [5]

Questo fenomeno è stato già osservato [1], a differenza del doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$), nel quale invece due neutroni decadono in due protoni con emissione di due elettroni, ma senza emissione di antineutrini [3].

Nel doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$) avvengono due decadimenti [3]:

- il primo è un decadimento beta dove un neutrone decade in un protone con emissione di elettrone e antineutrino.
- il secondo è un decadimento inverso, dove un neutrone decade, con assorbimento di un neutrino, in un protone con emissione di un elettrone.

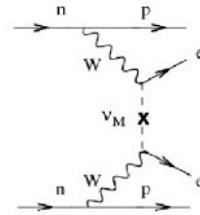


Figura 4: Doppio decadimento beta senza neutrini. Fonte [5]

Se ciò dovesse verificarsi, vorrebbe dire che il neutrino assorbito nel decadimento inverso è l'antineutrino emesso nel primo decadimento beta ; quindi neutrino e antineutrino sono la stessa particella[3].

1.4 L'obiettivo dell'esperimento NUMEN

L'obiettivo dell'esperimento NUMEN è ottenere informazioni sugli elementi di matrice nucleare (NME) del $0\nu\beta\beta$, e per farlo vengono studiate le reazioni nucleari di doppio scambio di carica Hi-DCE [1].

Negli ultimi anni si sono studiate queste reazioni presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN a Catania all'interno del progetto NUMEN, utilizzando fasci di ioni a bassa intensità.

Dato che si sono ottenuti risultati promettenti si è deciso di apportare modifiche sostanziali all'esperimento in modo da utilizzare anche fasci di ioni a più alta intensità [1].

Infatti le reazioni Hi-DCE studiate da NUMEN hanno una probabilità di accadimento estremamente bassa e quindi per poter ottenere una quantità di dati significativa in tempi ragionevoli, è necessario aumentare l'intensità dei fasci di ioni utilizzati [1].

1.5 Organizzazione dell'esperimento NUMEN

In questo paragrafo verrà descritto lo spettrometro MAGNEX utilizzato presso i Laboratori Nazionali del Sud (LNS) a Catania.

Per l'esperimento si producono e utilizzano fasci di ioni che colpiscono un isotopo, così da far avvenire reazioni Hi-DCE e misurarne i prodotti.

Come si vede dalla mappa in figura 5, in rosso sono indicate le linee di fascio che percorrono le sale sperimentali a partire dal ciclotrone superconduttore. Quello che interessa per l'esperimento NUMEN è il percorso che conduce alla zona sperimentale dove si trova lo spettrometro magnetico MAGNEX (in alto in figura 5). [1].

1.5.1 Il ciclotrone

I fasci di ioni necessari per l'esperimento vengono generati da un acceleratore di particelle, il Ciclotrone Superconduttore K800, che fornisce fasci con una dispersione energetica ed emittanza molto basse [1].

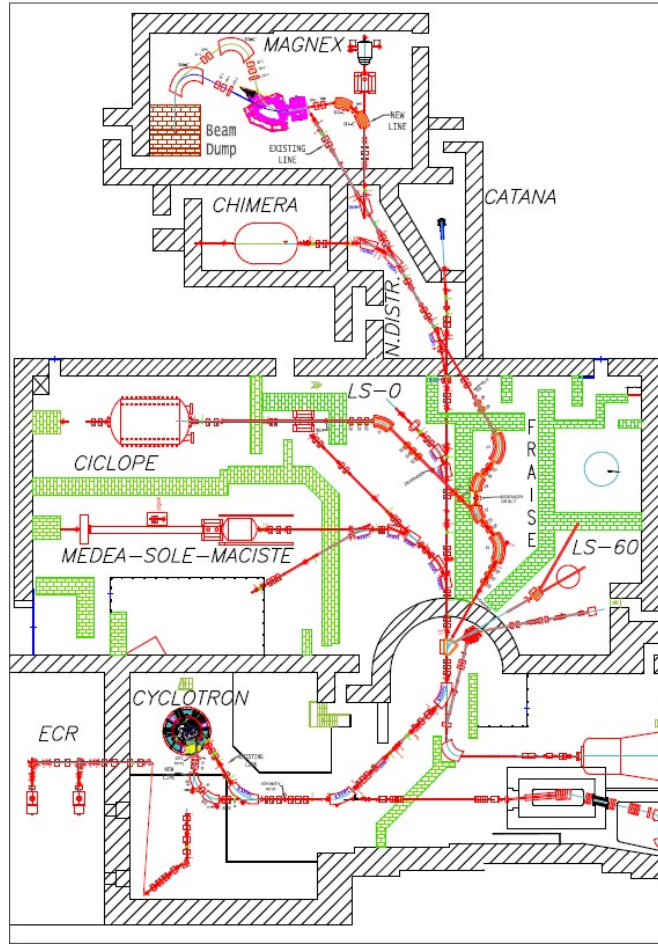


Figura 5: Mappa delle linee di fascio nelle varie sale sperimentali. Fonte:[7]

Negli ultimi anni il ciclotrone è stato rinnovato per ottenere dei fasci di ioni con un'intensità più alta di tre ordini di grandezza rispetto a quella precedente, portandola a 10^{13} pps [1, 8].

1.5.2 Lo spettrometro MAGNEX

MAGNEX è uno spettrometro magnetico ad alta accettanza composto dagli elementi indicati in figura 6.

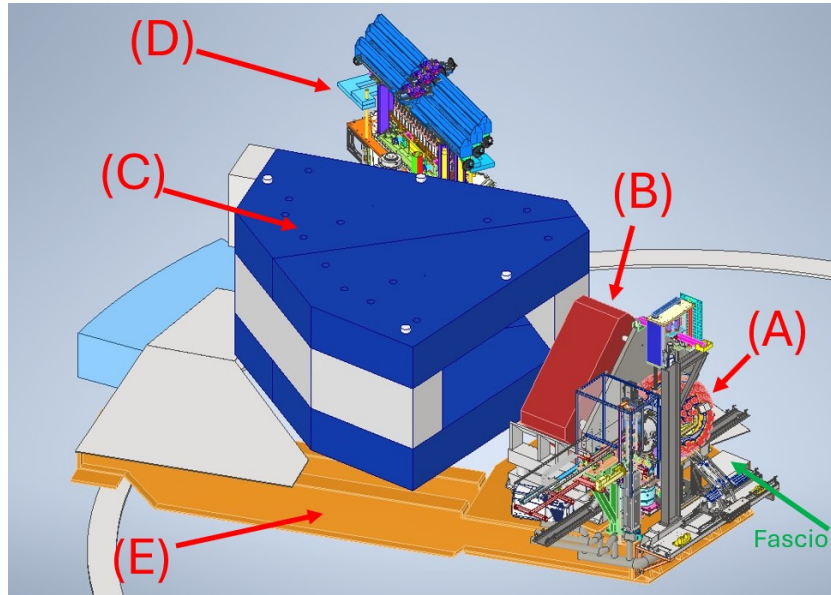


Figura 6: Modello 3D: Spettrometro MAGNEX

Gli elementi principali, che saranno descritti di seguito, sono:

- Camera di scattering, con bersaglio e G-NUMEN (A)
- Quadrupolo (B)
- Dipolo (C)
- Focal plane detector (D)
- Piattaforma rotante (E)

Nella figura 7 è rappresentata la struttura del MAGNEX vista dall'alto: il fascio di ioni arriva dalla destra, e colpisce il bersaglio (A); da lì i prodotti delle reazioni seguono traiettorie che passano attraverso il Quadrupolo (B), il Dipolo (C) e terminano nel Focal Plane Detector (D) [1].

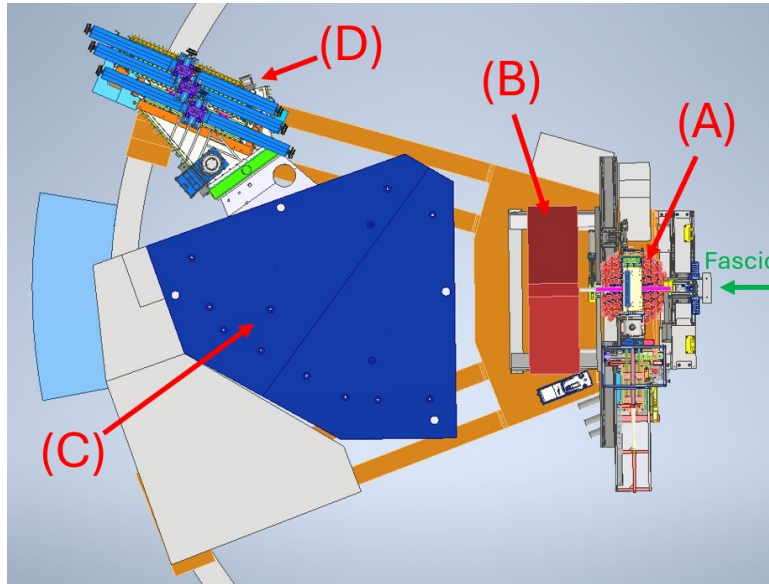


Figura 7: Modello 3D: Spettrometro MAGNEX, vista dall'alto

La piattaforma (E) sulla quale si trova il MAGNEX può ruotare meccanicamente attorno all'asse verticale che passa per il bersaglio (A).

Quindi lo spettrometro può compiere questo movimento rotatorio, e l'ampiezza di questo movimento viene regolata in base alla linea di fascio utilizzata [8]:

Se si opera con la linea di fascio ad alta intensità, il sistema realizza una piccola rotazione relativa di $\pm 3^\circ$, a seconda degli ioni che si utilizzano: $+3^\circ$ per ^{18}O , -3° per ^{20}Ne .

Se si utilizza invece la linea di fascio a bassa intensità, si effettua una rotazione più ampia, che va da -6° a $+15^\circ$, per studiare le reazioni di scattering a diversi angoli.

Di seguito sono approfonditi gli elementi dello spettrometro.

Camera di scattering e bersaglio

La camera di scattering è un involucro sferico di diametro 460 mm e spessore 6 mm e al centro di essa si trova il bersaglio che viene colpito dal fascio di ioni. Essa è realizzata in alluminio per limitare l'interferenza con i raggi gamma emessi dalla diseccitazione dei nuclei interessati dalle reazioni con gli ioni.

Il fascio di ioni entra dall'apertura (A) in figura 8.

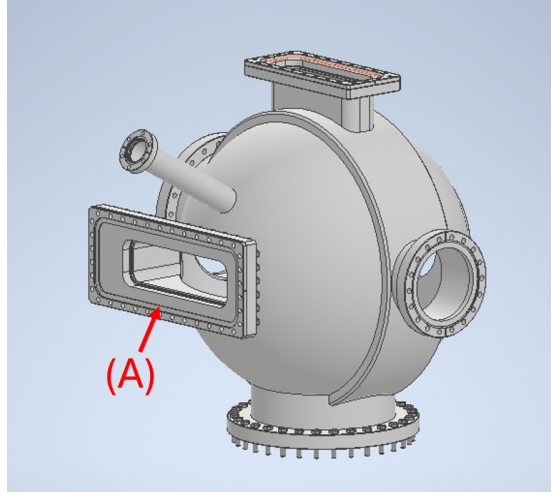


Figura 8: Modello 3D: camera di scattering

Il bersaglio è uno degli elementi più critici dell'esperimento. Esso viene colpito da fasci ad alta intensità e deve essere sottilissimo, di qualche centinaio di nanometri, per ottenere risoluzione energetica ottimale [1].

Il bersaglio è formato da isotopi di interesse per il $0\nu\beta\beta$, che vengono evaporati su un foglio sottile di materiale ad elevata conducibilità termica (grafite pirolitica altamente orientata HOPG oppure grafene multistrato MLG) [1]. Questo substrato ad elevata conducibilità è necessario per dissipare calore verso un criorefrigeratore e quindi evitare il surriscaldamento dei materiali bassofondenti [1].

Il quadrupolo

Il quadrupolo, figura 9, dello spettrometro MAGNEX è posizionato lungo la linea di fascio subito dopo il bersaglio, come si vede in figura 7. La sua funzione è quella di focalizzare verticalmente le particelle prodotte nelle reazioni [1].

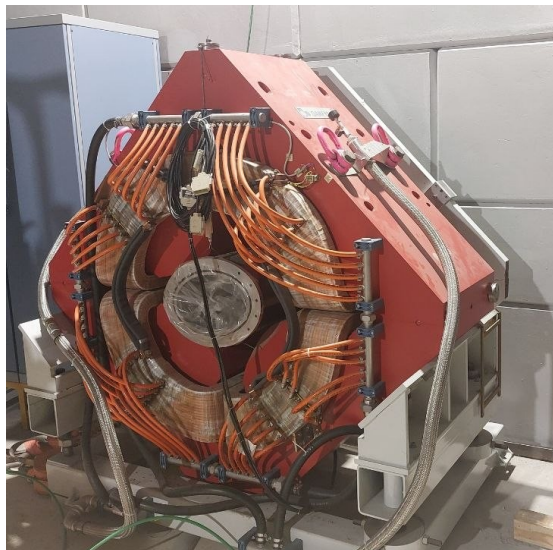


Figura 9: Il quadrupolo, Laboratori Nazionali del Sud

Dato il potenziamento del fascio di ioni è stato necessario aumentare la sua rigidità magnetica del 20%. Il suo campo magnetico massimo è stato aumentato fino a 1,139 T [1].

Il dipolo

Il dipolo (figura 10) nel MAGNEX si trova subito dopo il quadrupolo ed ha la funzione di analizzare gli ioni che lo attraversano. Infatti la traiettoria di uno ione all'interno del campo magnetico viene curvata di un certo angolo in funzione dalla sua massa e dalla sua carica. Così quando gli ioni passano nel dipolo, i vari ioni si separano lungo il piano [1].

Anch'esso è stato potenziato del 20% e il suo campo magnetico massimo è stato portato a 1,38 T [8].



Figura 10: Il dipolo, Laboratori Nazionali del Sud

Focal Plane Detector

I prodotti delle reazioni sono rivelati nel FPD, il focal plane detector. Con esso si misurano la posizione, l'angolo di incidenza, la perdita di energia e l'energia residua delle particelle [1].

Il nuovo Focal Plane Detector si trova in una camera da vuoto di forma irregolare, e dimensioni di circa 2 m x 2 m.

Questa camera è divisa internamente in due regioni tramite una finestra molto sottile (qualche μm) in Mylar [1], cioè polietilene tereftalato, che ha un'elevata resistenza alla trazione, flessibilità e capacità di tenuta dei gas.

- Una regione è ad alto vuoto e attraverso essa transitano gli ioni che non hanno interagito con il bersaglio. Questi vengono indirizzati lungo il percorso di fascio che termina nel "beam dump", cioè una struttura di "smaltimento" posizionata al limite della zona sperimentale che permette di estinguere i fasci in modo controllato. [1].
- L'altra regione è a bassa pressione ed è quella dove si trova il FPD.

Il FPD è costituito da un tracciatore a gas e da un rivelatore di identificazione delle particelle (PID - Particle Identification Detector) [1].

Nel tracciatore a gas viene ricostruita la traiettoria delle particelle. In esso gli ioni provenienti dalle reazioni attraversano un volume di gas isobutano a bassa pressione, tra 10 e 100 mbar assoluti [1].

Dopo essere passati nel tracciatore a gas, gli ioni impattano contro il PID, composto da 720 telescopi a due stadi. Per ottimizzare l'efficienza geometrica e facilitare le operazioni di manutenzione, i telescopi non sono montati singolarmente, ma sono raggruppati in 36 strutture verticali chiamate "torri"; ogni torre contiene 20 telescopi [1].

Il primo stadio è costituito da celle di Carburo di Silicio (SiC) e serve a misurare la perdita di energia ΔE degli ioni.

Il secondo stadio è un cristallo scintillatore di Ioduro di Cesio drogato al Tallio (CsI(Tl)), che permette di misurare l'energia residua: l'energia delle particelle è convertita in fotoni che colpendo il fotodiodo vengono convertiti in segnale elettrico.

1.5.3 Rivelatore G-NUMEN

La risoluzione energetica dello spettrometro MAGNEX è di circa 500 keV, e non è abbastanza per distinguere gli stati eccitati di alcuni prodotti di alcune reazioni [1]. In particolare non è abbastanza per isolare i livelli energetici di Pd, Nd, Gd.

Per questo motivo si misurano i raggi gamma emessi dalle reazioni con dei rivelatori distribuiti attorno alla camera di scattering [1]. Essi fanno parte del sistema G-NUMEN, che viene trattato nel capitolo 2.

2 G-NUMEN

2.1 Descrizione

Il sistema G-NUMEN è formato da 109 rivelatori che devono essere posizionati attorno alla camera di scattering, figura 11 e figura 12. La sua funzione è la rivelazione dei raggi gamma emessi dai nuclei eccitati del bersaglio [1].

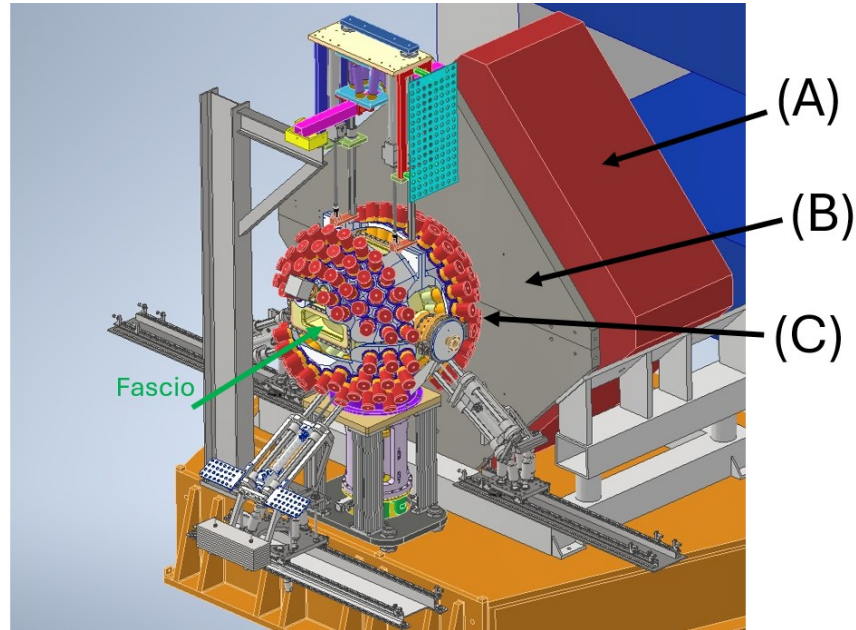


Figura 11: Modello 3D: G-NUMEN con spettrometro MAGNEX. Quadrupolo (A), schermo del quadrupolo (B), rivelatori (C)

I rivelatori vengono collocati ad un centimetro dalla superficie della camera (radialmente) e ricoprono circa il 20% dell'angolo solido attorno al bersaglio.

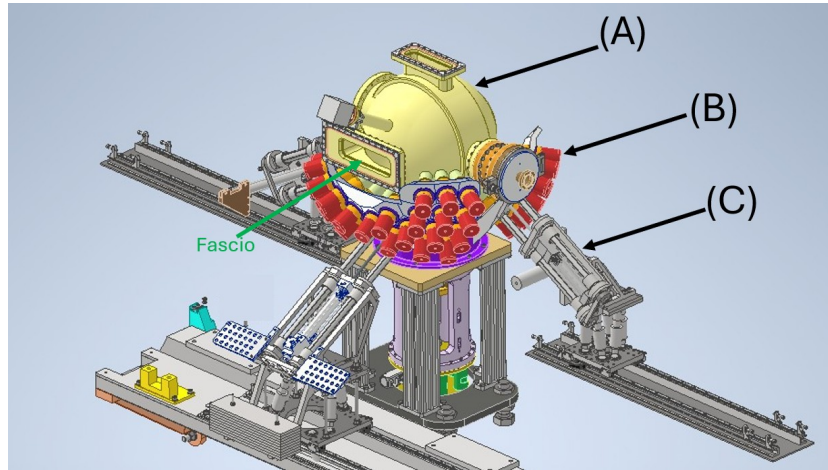


Figura 12: Modello 3D: G-NUMEN senza emisfero superiore, per evidenziare la camera di scattering (A). Rivelatori (B), sistema di movimentazione (C)

2.2 I supporti dei rivelatori: i gusci

I rivelatori sono installati su dei supporti che servono a tenerli nella posizione attorno alla camera di scattering. Questi supporti sono utilizzati per facilitare la movimentazione e rimozione dei rivelatori e per evitare che i rivelatori vadano ad appoggiarsi sulla camera causando delle sollecitazioni.

I supporti sono quattro gusci che vanno a circondare la camera di scattering. Sono i seguenti:

- Guscio emisfero superiore (figura 13 e figura 14) per 62 rivelatori.
- Guscio quadrante inferiore anteriore (figura 15 e figura 16) per 25 rivelatori.
- Guscio ottante inferiore posteriore sinistro (figura 17a) per 9 rivelatori.
- Guscio ottante inferiore posteriore destro (figura 17b) per 13 rivelatori.

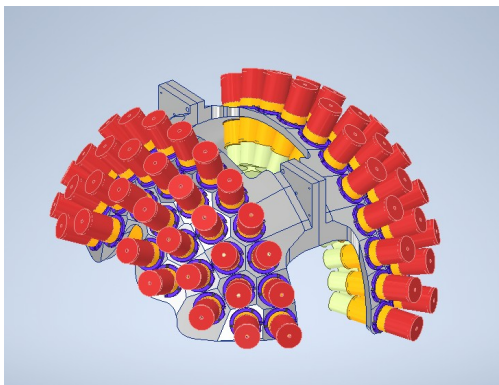


Figura 13: Modello 3D: Guscio emisfero superiore con rivelatori

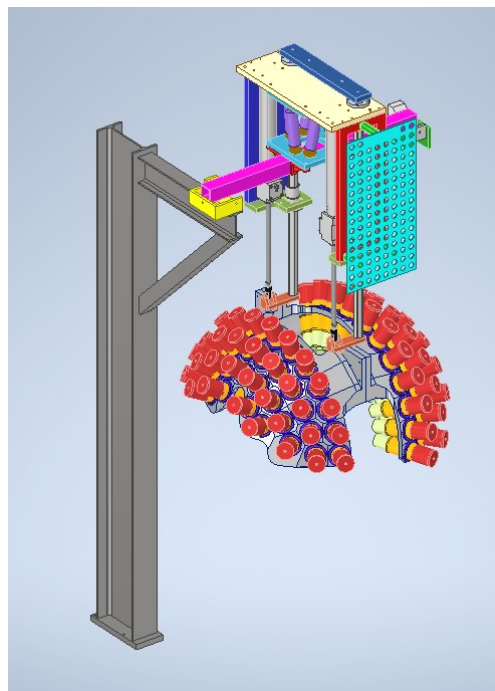


Figura 14: Modello 3D: emisfero superiore con sistemi di movimentazione

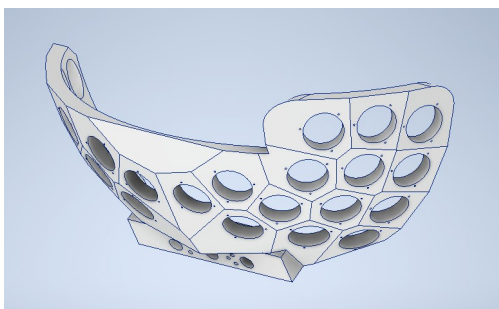


Figura 15: Modello 3D: Guscio quadrante inferiore anteriore

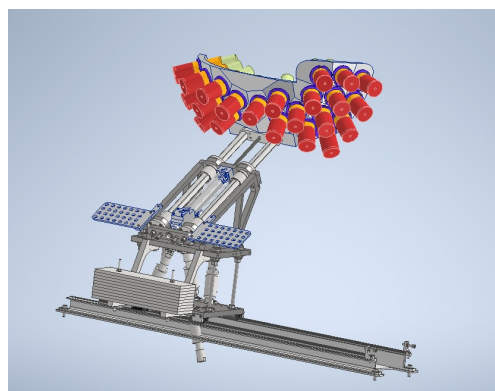
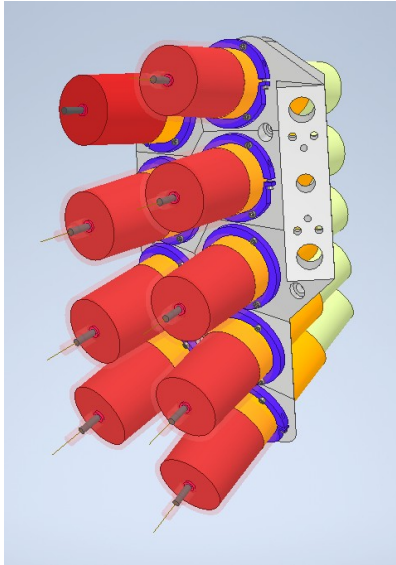
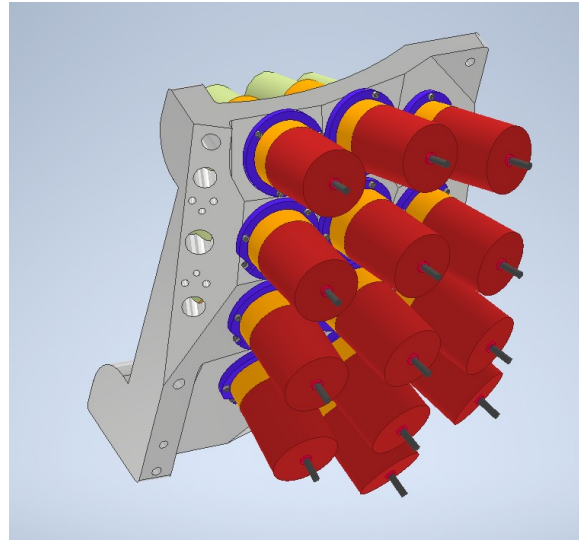


Figura 16: Modello 3D: Guscio quadrante con rivelatori e sistemi di movimentazione



(a) Guscio ottante sinistro



(b) Guscio ottante destro

Figura 17: Modello 3D: Gusci ottanti con rilevatori

La differenza tra anteriore e posteriore indica la posizione rispetto al bersaglio considerando direzione e verso del fascio di ioni. Posteriore vuol dire oltre il bersaglio rispetto all'arrivo del fascio; anteriore vuol dire prima del bersaglio.

Ognuno dei quattro gusci ha un sistema di posizionamento e uno di movimentazione.

Il primo è costituito dalla piattaforma di Stewart e serve a regolare la posizione dei gusci. La piattaforma di Stewart è approfondita nel capitolo 3.

Il secondo è basato su un attuatore pneumatico e serve a avvicinare (o allontanare) i rivelatori alla (o dalla) camera di scattering. È approfondito nel seguito di questo capitolo

In figura 18 sono rappresentati i gusci degli ottanti destro e sinistro con i sistemi di movimentazione e posizionamento.

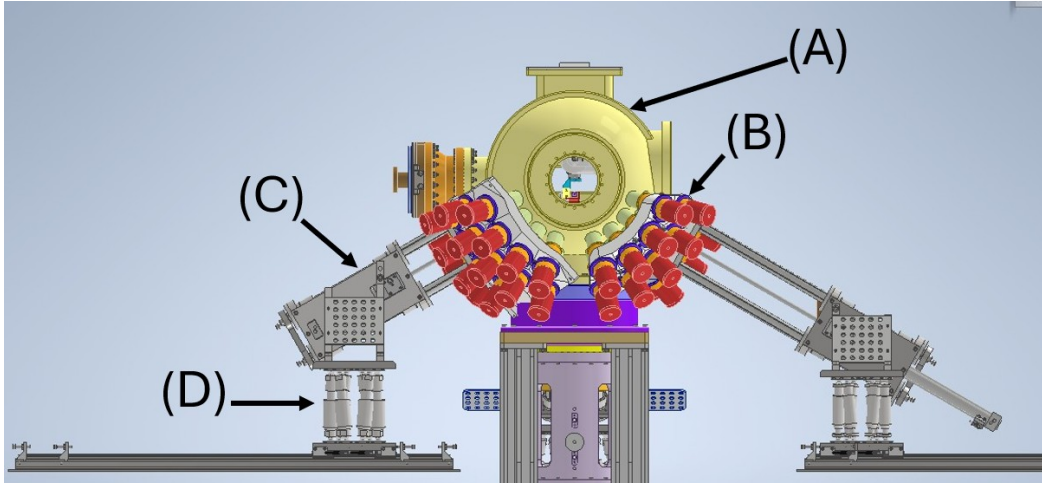


Figura 18: Modello 3D: Vista posteriore al bersaglio. Camera di scattering (A) Gusci ottanti (B) Sistemi di movimentazione (C) Sistemi di posizionamento (D)

Attualmente sono stati realizzati soltanto l'ottante inferiore destro e l'ottante inferiore sinistro, con i relativi sistemi di movimentazione e posizionamento.

Si trovano nel Laboratorio Tecnologico della sezione INFN di Torino, dove devono essere collaudati prima di portarli ai Laboratori del Sud a Catania.

Per quanto riguarda il sistema dell'ottante sinistro, la maggior parte delle misure necessarie sono state effettuate negli ultimi mesi e sono oggetto di descrizione e discussione nei prossimi capitoli di questa tesi.

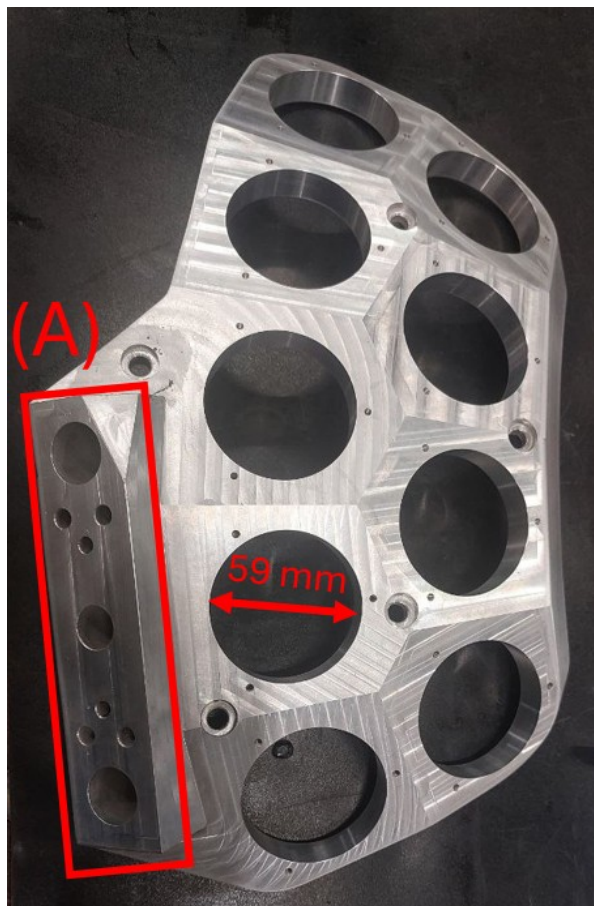
Per il sistema dell'ottante destro sono state effettuate delle misure sulle singole parti i cui risultati sono simili a quelli ottenuti per l'ottante sinistro e quindi non verranno presentati. Per l'ottante destro si possono facilmente adattare le stesse metodologie e gli stessi programmi utilizzati per il sinistro.

2.2.1 Guscio ottante sinistro

In figura 19 si può vedere il guscio dell'ottante inferiore sinistro.



(a) Parte interna



(b) Parte esterna

Figura 19: Guscio ottante sinistro

Esso è realizzato in alluminio ed ha nove fori per i rivelatori di diametro pari a 59 mm. All'interno è stato realizzato con una superficie sferica liscia. Sulla parte esterna, figura 19b, sono stati realizzati dei piani di riferimento per i fori. Ognuno dei nove fori ha infatti un piano perpendicolare al suo asse.

La zona (A) indicata in figura 19b con il rettangolo rosso è la parte del guscio che si connette al sistema di movimentazione, aspetto approfondito nel paragrafo 2.4.1.

2.2.2 Guscio ottante destro

In figura 20 c'è il guscio dell'ottante inferiore destro.

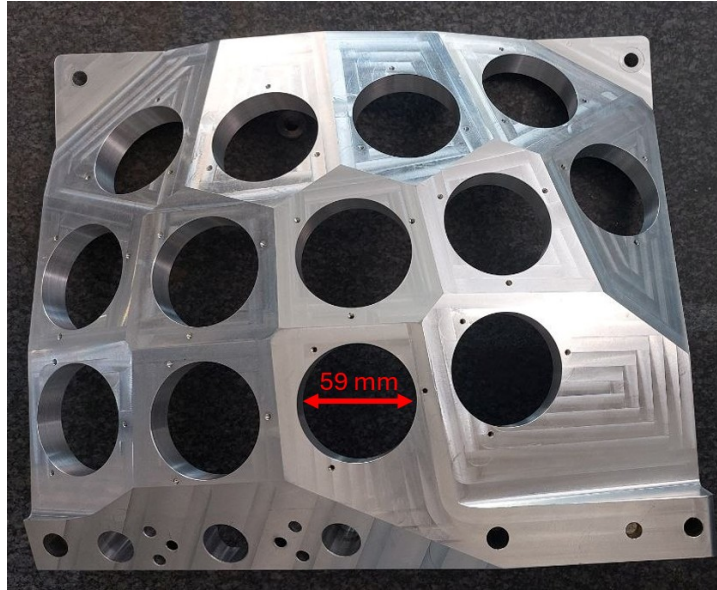


Figura 20: Guscio ottante destro, parte esterna

Ha 13 fori da 59 mm per i rivelatori e, come il guscio sinistro, è realizzato in alluminio e per ogni foro ha un piano perpendicolare al suo asse.

2.3 Rivelatori gamma

I rivelatori gamma sono costituiti da tre parti principali:

La prima parte, rappresentata in giallo chiaro nella figura 21, è quella che sarà più vicina alla superficie della camera, ed è un cristallo di bromuro di lantanio drogato al cerio ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$), in grado di rilevare i raggi gamma e produrre fotoni di scintillazione. Si è scelto il $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ perchè offre ottima risoluzione sia energetica che temporale, ed ha buona resistenza alle radiazioni.

La parte centrale, in colore arancione, è costituita dal fotocatodo e dal fotomoltiplicatore (PMT). I fotoni di scintillazione, colpendo il fotocatodo, producono elettroni che si moltiplicano attraversando il fotomoltiplicatore.

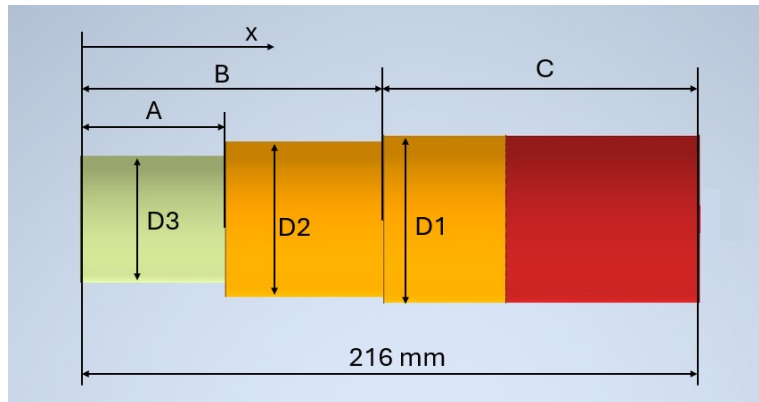


Figura 21: Rivelatore gamma, modello 3D

Nell'ultima parte, in colore rosso, è inserito il circuito elettronico che amplifica il segnale. Il circuito necessita di due cavi per il rivelatore, uno per il segnale e uno per l'alimentazione.

Attualmente ai Laboratori del Sud ci sono 14 prototipi di rivelatore acquistati presso la ditta Epic Crystal, ne si può vedere uno in figura 22.

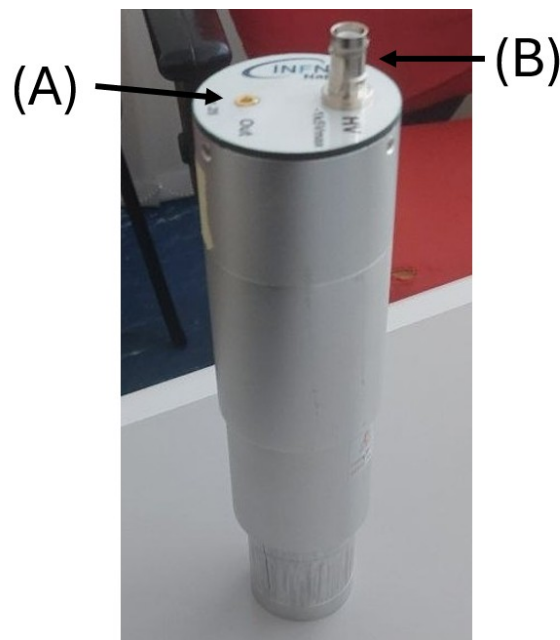


Figura 22: Rivelatore gamma, prototipo. (A) uscita del segnale, (B) connettore per l'alimentazione

Essi sono diversi dalla versione finale dei rivelatori. La differenza tra prototipi e versione finale è legata alla parte relativa all'elettronica. I primi, come si vede da figura 22, hanno un connettore per l'alimentazione. La versione finale invece non avrà connettori in quanto non vi è sufficiente spazio tra i rivelatori e lo schermo del quadrupolo, come si vede in figura 23.

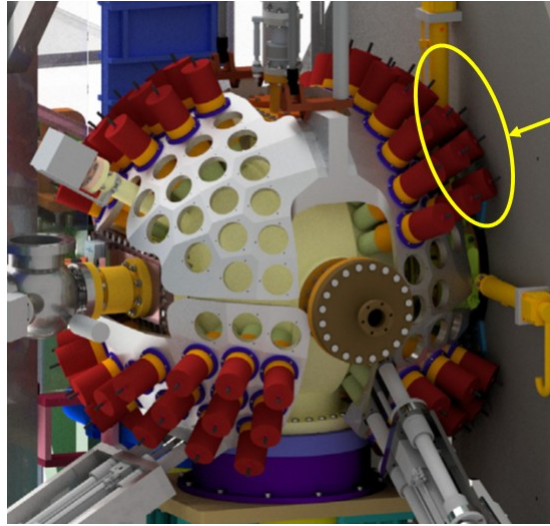


Figura 23: modello 3D: spazio tra rivelatori e schermo del quadrupolo

2.3.1 Montaggio rivelatori gamma

Il montaggio dei rivelatori sui gusci avviene con una ghiera, figura 24.

Essa ha un diametro interno pari al diametro $D1$ del rivelatore, in modo che possa inserirsi su di esso.

La ghiera va sistemata ad una posizione assiale lungo l'asse x (figura 21) tale che il rivelatore si trovi ad 1 cm dalla camera di scattering, che, considerando la posizione del guscio attorno alla camera, corrisponde a 124 mm lungo l'asse x .

Per sistemare la ghiera in questa posizione si utilizzerà uno strumento cilindrico cavo di lunghezza uguale a 124 mm e diametro interno leggermente maggiore di quello del rivelatore. Il rivelatore quindi si sistema in questo strumento e poi si inserisce la ghiera che va in battuta con lo strumento, quindi a 124 mm lungo l'asse x .



Figura 24: Rivelatore gamma con ghiera

Quando la ghiera è in posizione bisogna avvitare la vite di chiusura (figura 25), per stringere la ghiera e bloccarla con il rivelatore. Si può quindi rimuovere il rivelatore dallo strumento cilindrico.

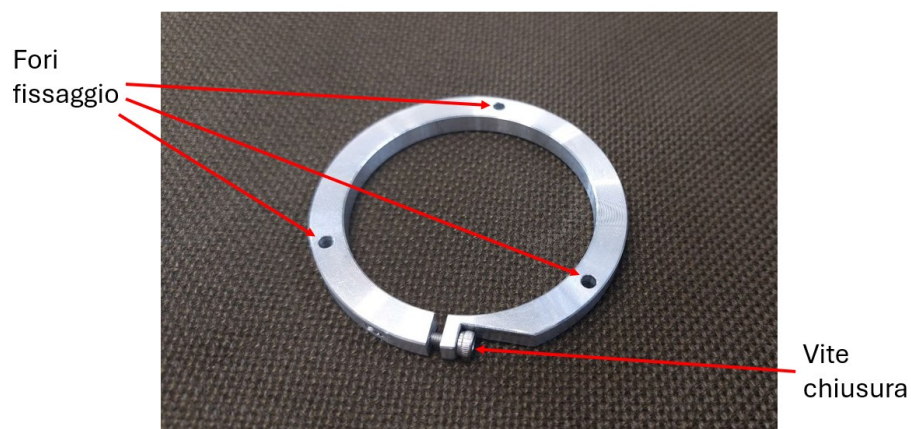


Figura 25: Ghiera per rivelatore

Per sistemare il rivelatore attorno alla camera di scattering, la ghiera va in battuta con la parte esterna del guscio, in particolare con il piano corrispondente

al foro del rivelatore. Viene poi fissata a questo piano con tre viti che vanno nei tre fori, chiamati "fori fissaggio" in figura 25.

In questo modo il rivelatore viene montato sul guscio ed è quindi solidale ad esso.

2.3.2 Misurazioni sui rivelatori gamma

Sono state eseguite delle misurazioni su questi rivelatori utilizzando un calibro. Sono stati misurati i tre differenti diametri dei rivelatori, le distanze dei due spallamenti e la lunghezza totale.

In particolare si è prestata attenzione alla misura effettiva del diametro D1, cioè quello della parte più larga (quella in rosso e arancione nella figura 26) dato che è la parte che deve coincidere con i fori dei gusci.

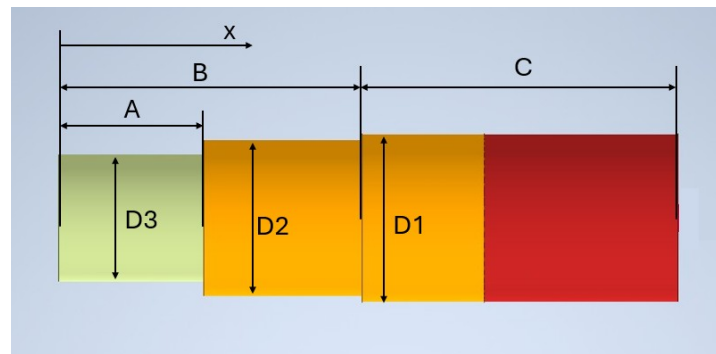


Figura 26: Rivelatore gamma, modello 3D

Dalle misurazioni effettuate sui 14 rivelatori attualmente ai Laboratori del Sud si è riscontrato un intervallo di valori del diametro D1 compreso tra 59,04 mm e 59,18 mm, come si vede da figura 27.

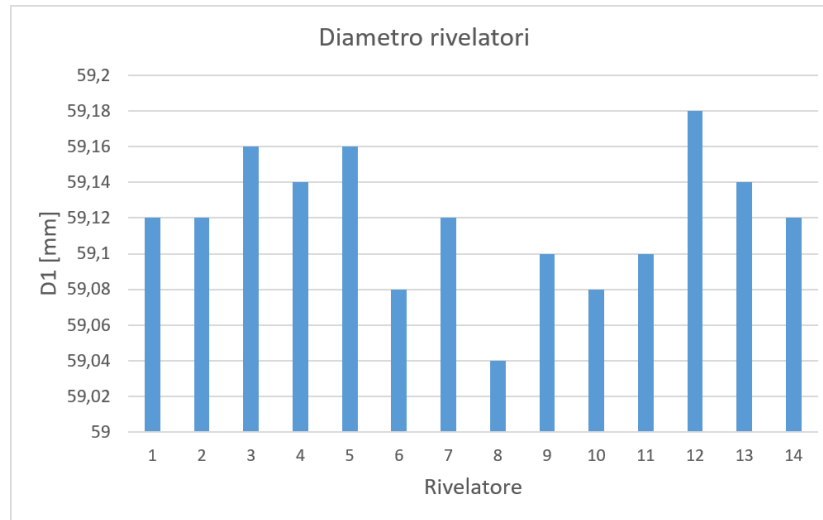


Figura 27: Diametro D1 dei singoli rivelatori

Inoltre si è constatato che non sono perfettamente cilindrici, ma hanno una leggera ovalizzazione, che fa variare il diametro fino a circa 0,1 mm nella stessa sezione del rivelatore.

Si è misurata anche la loro massa, ottenendo valori inferiori ai circa 700 g previsti. I valori di massa ottenuti vanno da un minimo di 644 g ad un massimo di 661,9 g. Ciò non rappresenta un problema per l'esperimento.

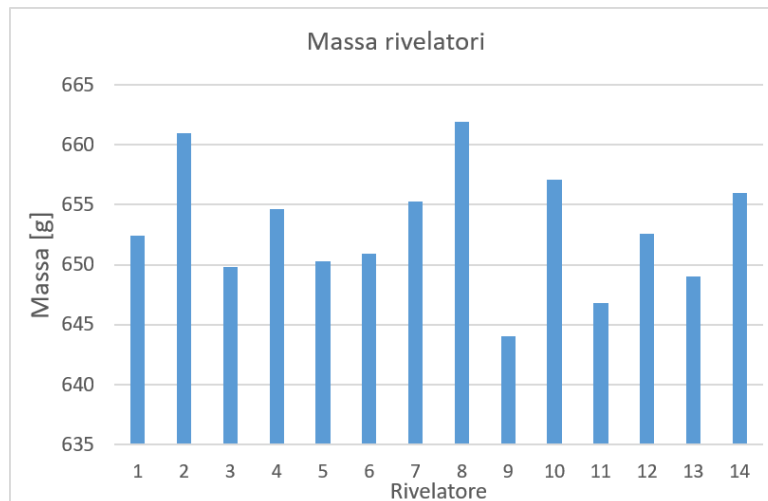


Figura 28: Massa dei singoli rivelatori

Il loro peso non è uniformemente distribuito, in quanto il cristallo di bromuro di lantanio ha una densità nettamente maggiore rispetto alle altre due parti del rivelatore. Ciò significa che il loro centro di massa non si troverà nella posizione assiale media, ma sarà più spostato verso il cristallo. Quindi anche la posizione del centro di massa lungo l'asse dei rivelatori è stata oggetto di prove.

In queste prove si è cercato di ricavare una stima della posizione del centro di massa lungo l'asse x (figura 26). Si è stimato un valore compreso tra 76 e 78 mm a partire dall'origine dell'asse x.

2.4 Sistemi di movimentazione e posizionamento dei gusci

Come scritto precedentemente, ognuno dei gusci deve essere movimentato e tenuto in posizione con dei sistemi meccanici che si muovono in modo semi-automatico, figura 29.

I sistemi di movimentazione utilizzano attuatori cilindrici pneumatici comandati da elettrovalvole, descritti nei paragrafi successivi. Essi sono automatici, in quanto quando c'è bisogno di movimentare i gusci, gli operatori non possono entrare nella zona sperimentale per il livello di radiazioni presenti. In più a causa dell'elevata quantità di strumentazione presente nei pressi di MAGNEX per gli operatori non ci sarebbe neanche spazio per operare.

I sistemi di posizionamento fanno uso della piattaforma di Stewart, un manipolatore a sei gradi di libertà che permette una movimentazione estremamente precisa. É stata scelta perchè permette di raggiungere la necessaria precisione meccanica, ripetibilità e riproducibilità dei posizionamenti dei rivelatori. Viene trattata nel capitolo 3.

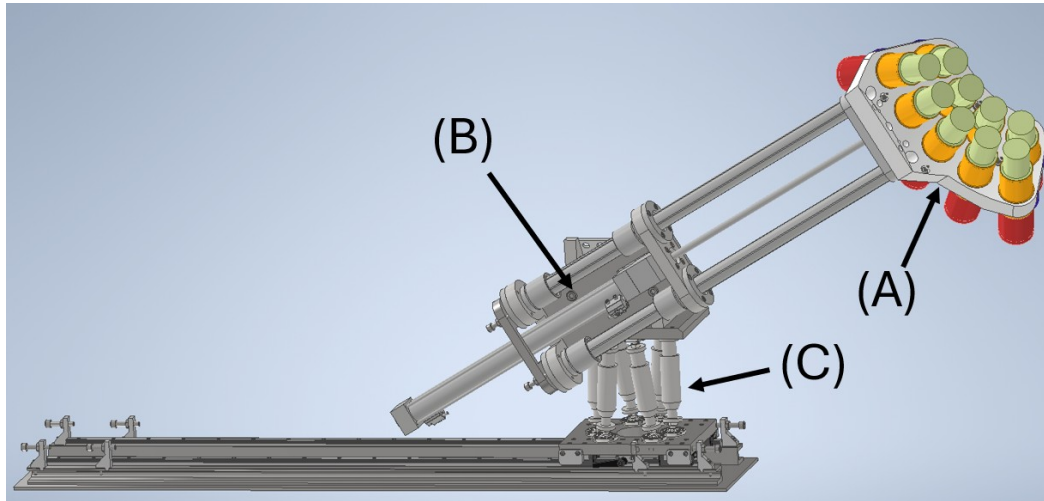


Figura 29: 3D rendering: sistema ottante sinistro. Guscio (A), sistema di movimentazione (B), sistema di posizionamento (C)

2.4.1 Sistema di movimentazione

Gli attuatori utilizzati nei sistemi di movimentazione dei gusci sono dei cilindri pneumatici lineari a doppio effetto. Dato che sono a doppio effetto hanno due camere nelle quali iniettare aria e questo permette il movimento bidirezionale lungo l'asse del cilindro.

L'attuatore utilizzato è un cilindro pneumatico SMC serie MB ((A) in figura 30).

La posizione di lavoro del cilindro è quella in cui è completamente esteso, ed è la sua posizione di finecorsa. In questa condizione il guscio si troverà attorno alla camera di scattering nella posizione desiderata.

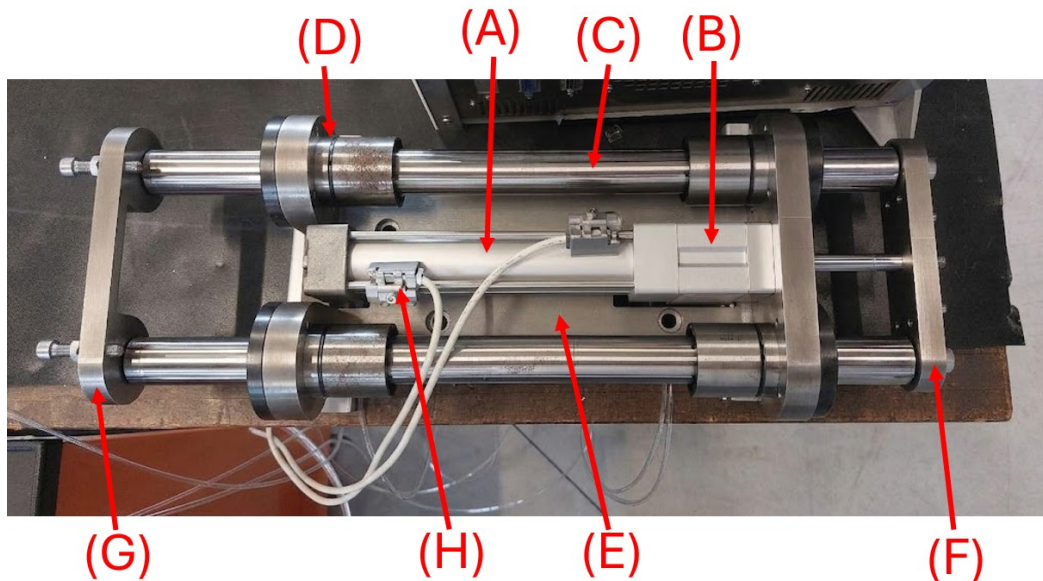


Figura 30: Sistema di movimentazione dell'ottante destro. Quello dell'ottante sinistro ha gli stessi componenti. Cilindro pneumatico (A), freno pneumatico (B), guide a ricircolo di sfere (C), chiocciolle (D), piastra (E), piastra superiore (F), piastra inferiore (G), finecorsa (H)

Questi attuatori hanno un freno pneumatico ((B) in figura 30). Il freno è normalmente attivo, ciò significa che quando si manda l'aria nel freno esso si disattiva, quando invece non c'è pressione d'aria nel freno allora è in funzione. Questo freno è importante per due motivi:

- garantisce che il guscio sia completamente fermo una volta posizionato attorno alla camera di scattering
- nel caso di guasti o di perdite di pressione blocca il cilindro evitando che continui a muoversi quando viene a mancare la pressione

Il cilindro può assorbire soltanto il carico assiale, quindi le forze radiali/tangenziali vengono scaricate su due guide cilindriche laterali a ricircolo di sfere ((C) in figura 30), disposte simmetricamente ai lati dell'attuatore.

Queste guide sono alberi scanalati a ricircolo di sfere BSLM30 della ditta Misumi.

Esse scorrono all'interno di quattro chioccioline (D in figura 30), due per guida, che sono fissate ad una piastra rettangolare (E). Su questa piastra viene fissato anche l'attuatore.

Sull'estremità superiore delle guide è montata una piastra, che chiameremo piastra superiore (F).

Alla stessa piastra è fissato il pistone tramite un dado avvitato sulla sua filettatura, (A) in figura 31.

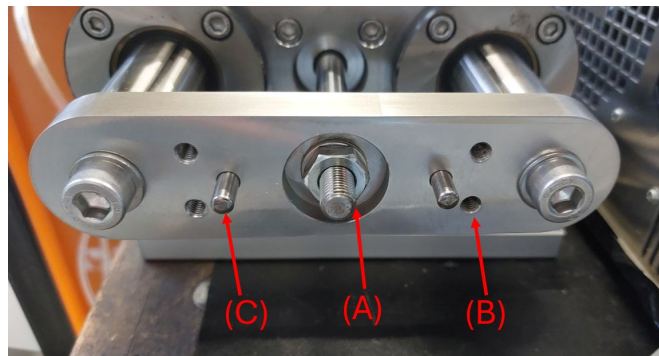


Figura 31: Piastra superiore. Dado per pistone (A), fori per viti (B), spine (C)

Alla piastra superiore si collega il guscio utilizzando quattro viti per i fori (B) e due spine (C), figura 31.

Quindi pistone, guide, piastra superiore e guscio sono tutti solidali tra loro, quindi si muovono insieme e possono compiere un moto relativo assiale (lungo l'asse dell'attuatore) rispetto alla piastra rettangolare ((E) in figura 30) e tutto ciò che è fissato ad essa.

Sull'estremità inferiore delle guide è montata un'altra piastra, che chiamiamo piastra inferiore ((G) in figura 30).

In questa piastra inferiore ci sono altre due viti ((B) in figura 32) che servono a regolare la posizione assiale di finecorsa delle guide (e quindi del guscio) lungo l'asse del cilindro.

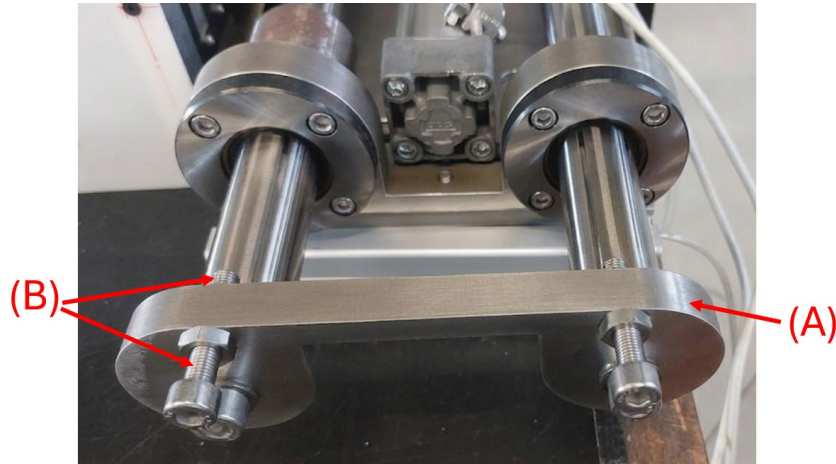


Figura 32: Piastra inferiore (A), viti per regolazione (B)

Infatti queste viti vanno a battuta contro le chioccioline, quindi avvitandole e svitandole si può regolare la distanza tra piastra inferiore (G)(solidale alle guide e al guscio) e chioccioline (solidali a piastra rettangolare (E)) nella posizione di finecorsa, che è quella in cui il guscio con i suoi rivelatori si trova in posizione di operatività, vicino alla camera di scattering.

I finecorsa (H) in figura 30 saranno approfonditi nel capitolo 5.

2.5 Sistema ottante sinistro

I sistemi di movimentazione e posizionamento dell'ottante sinistro sono già stati montati e su di essi sono stati eseguiti test e misurazioni ai laboratori INFN di Torino, che verranno trattati in questa tesi.

Il sistema di movimentazione, cioè il blocco con l'attuatore, guide, piastre, ecc, viene montato sulla piattaforma di Stewart tramite due squadre ((A) in figura 33), che vengono avvitate sulla piattaforma (B) e sulla piastra rettangolare (C).

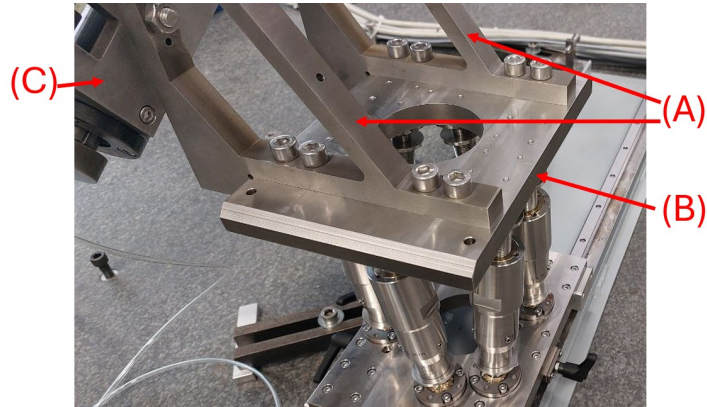


Figura 33: Montaggio del blocco attuatore sull piattaforma di Stewart

Ciò rende solidali la base superiore della piattaforma di Stewart e la piastra rettangolare, con tutto ciò che è fissato ad essa.

Quindi cambiando posizione e orientamento della base superiore della piattaforma si cambia allo stesso modo posizione e orientamento dell'attuatore e di conseguenza del guscio.

2.6 Sistema ottante destro

Tutti gli elementi che costituiscono il sistema di posizionamento e di movimentazione dell'ottante destro sono a disposizione all'INFN a Torino.

Essi verranno misurati e successivamente assemblati a realizzare il sistema completo.

Questa attività segue il collaudo dell'ottante sinistro.

2.7 Controllo automatico attuatori

I cilindri pneumatici sono comandati da elettrovalvole, e nell'esperimento NUMEN queste valvole saranno controllate tramite un PLC, parte del sistema di controllo di tutto l'esperimento, denominato "slow control system".

Verranno utilizzate due elettrovalvole per cilindro, di cui una per iniettare aria nelle camere a circa 6 bar, l'altra per l'aria che agisce sul sistema del freno.

Per testare il controllo dei sistemi di movimentazione è stato utilizzato un PLC della marca di fabbrica Crouzet.

Il funzionamento del sistema di controllo movimentazione, del PLC e i programmi di controllo sono trattati nel capitolo 5.

3 Piattaforma di Stewart

3.1 Descrizione

La piattaforma di Stewart, figura 34, è un manipolatore parallelo a sei gradi di libertà. Essa è costituita da una base inferiore fissa e una superiore mobile, che è sostenuta e movimentata tramite sei "gambe" meccanicamente indipendenti.

Quando si varia la lunghezza di una o più gambe cambia la posizione e orientamento della base superiore mobile rispetto a quella inferiore fissa, tutto ciò con elevata precisione.

Proprio per questo si utilizza nell'esperimento NUMEN, dato che c'è bisogno che i gusci vengano posizionati con grande precisione.

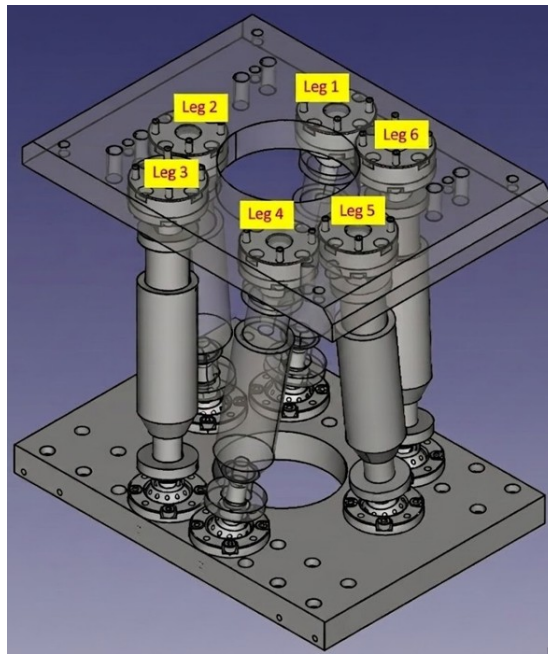


Figura 34: Piattaforma di Stewart

3.2 Sistemi di posizionamento degli ottanti

I sistemi di posizionamento dei gusci dei due ottanti inferiori utilizzano entrambi una piattaforma di Stewart, che come "gambe" ha delle viti micrometriche, descritte

in seguito.

In figura 35 si può vedere la piattaforma di Stewart utilizzata per l'ottante sinistro, in figura 36 la piattaforma di Stewart dell'ottante destro.

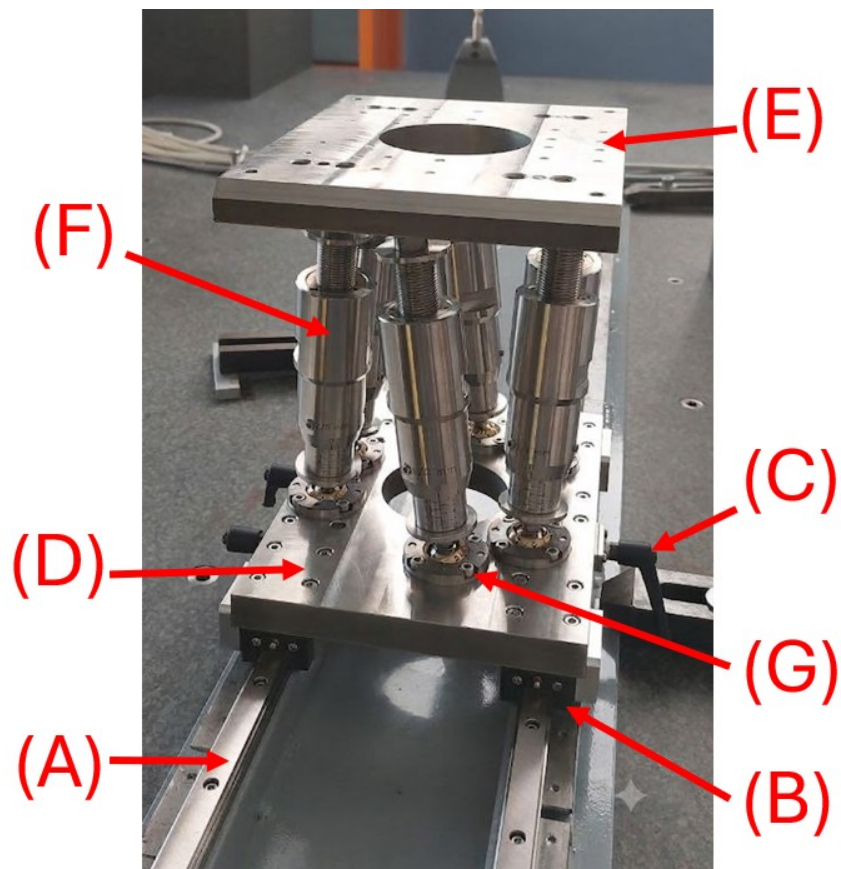


Figura 35: Piattaforma di Stewart per l'ottante sinistro

I sistemi di posizionamento sono costituiti dai seguenti elementi:

- Guide lineari (A)
- Carrelli (B)
- Morsetti (C)
- Base inferiore piattaforma di Stewart (D)

- Base superiore piattaforma di Stewart (E)
- Viti micrometriche (F)
- Giunti sferici (G)

Le due piattaforme sono identiche ad eccezione delle viti micrometriche.

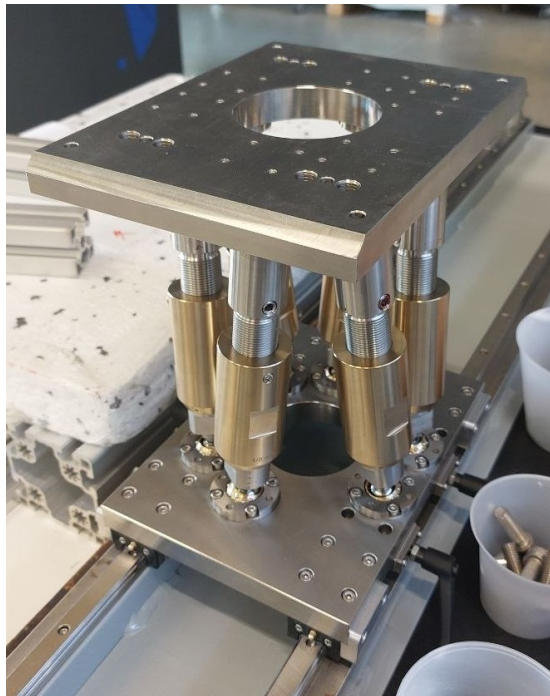


Figura 36: Piattaforma di Stewart per l'ottante destro

3.2.1 Base inferiore

Le piattaforme dei due ottanti hanno le stesse basi inferiore, figura 37.

Il foro al centro della base, di diametro 70 mm, è stato realizzato per permettere il passaggio dei tubi dell'aria per gli attuatori pneumatici e dei cavi elettrici dei finecorsa

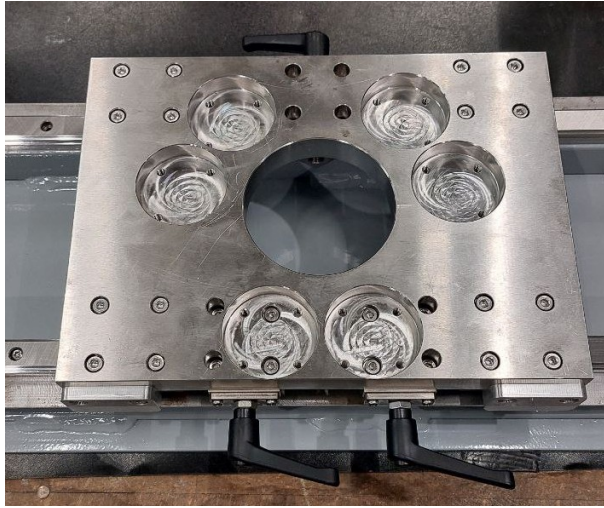


Figura 37: Base inferiore

La base inferiore ha sei ribassamenti circolari per alloggiare i giunti sferici delle viti (gambe).

I carrelli che permettono lo scorrimento sulle guide lineari sono posizionati sotto la superficie inferiore della base.

3.2.2 Guide lineari

La piattaforma di Stewart si muove su delle guide lineari tramite due rotaie. Servono per portare il sistema dalla posizione di lavoro, che si trova ad un finecorsa, alla posizione per la manutenzione, e viceversa.

Le guide lineari sono composte da una base (A), in figura 38, e da due rotaie (B) che si posizionano sopra la base avvitandole con una serie di viti. Su queste rotaie sono inseriti i carrelli che possono scorrere linearmente.

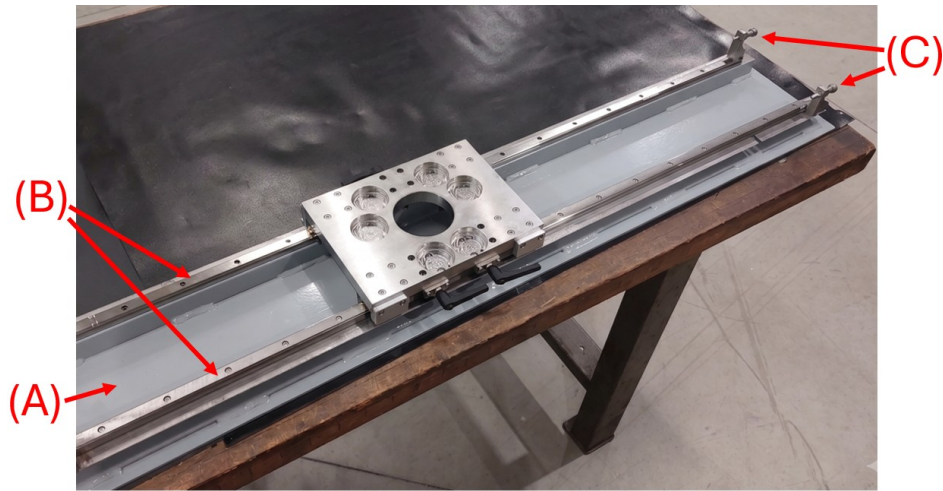


Figura 38: Guide lineari

Questa base verrà poi fissata sull'apparato MAGNEX all'interno dell'esperimento NUMEN.

Alle due estremità di queste guide ci sono i finecorsa (C) indicati in figura 38, costituiti da due viti.

Nella posizione di lavoro dell'esperimento, la base inferiore della piattaforma di Stewart va a battuta contro queste viti.

Avvitando o svitando queste viti si può variare la distanza tra la base della piattaforma e i finecorsa (C); così si regola la posizione lineare di finecorsa della piattaforma.

Inoltre, come si vede dal modello 3D in figura 39, questi finecorsa si possono inserire in due posizioni differenti.

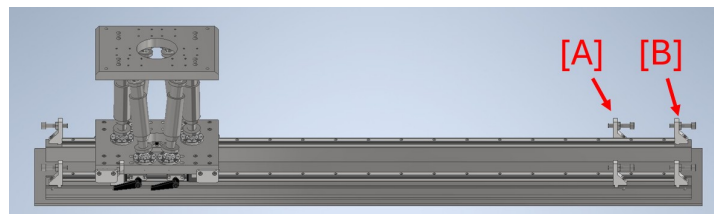


Figura 39: Modello 3D, [A] e [B] sono le due possibili posizioni dei finecorsa

3.2.3 Carrelli e morsetti di serraggio

Sulle guide lineari scorrono i carrelli (A), figura 40, che sono inseriti nelle rotaie. Sono quattro carrelli che vengono fissati alla base della piattaforma di Stewart utilizzando quattro viti per carrello.

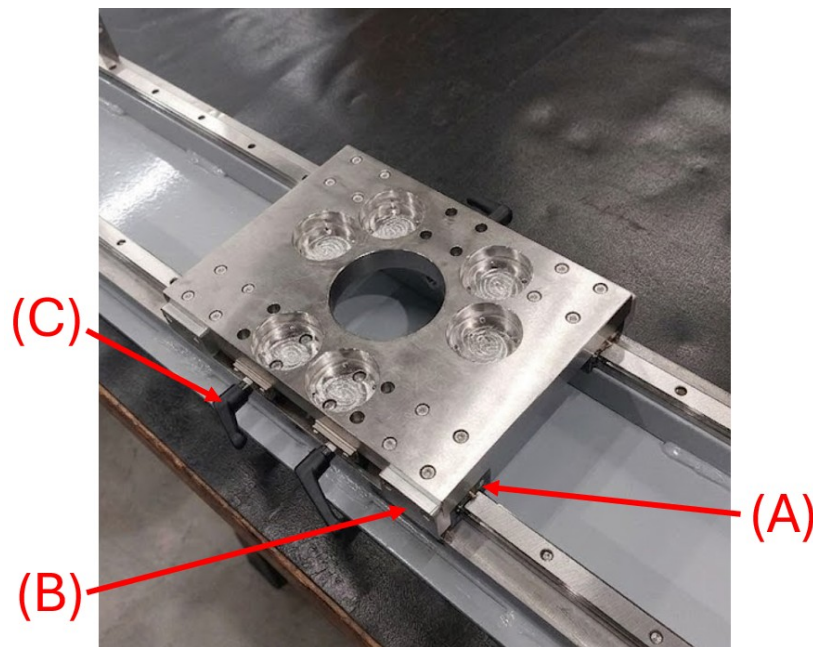


Figura 40: Base inferiore con carrelli e morsetti

Questi carrelli sono della ditta Misumi, con codice SSXRB24, figura 41.

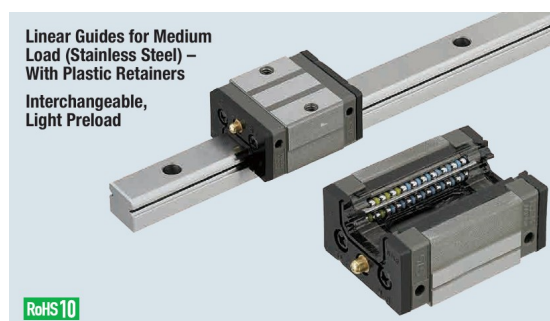


Figura 41: Carrelli Misumi SSXRB24

Inoltre per ogni carrello è presente, lateralmente alla base della piattaforma, un elemento (B) (figura 40) che permette il preciso posizionamento del carrello rispetto alla piattaforma di Stewart.

Sulla base inferiore della piattaforma sono avvitati anche tre morsetti di serraggio ((C) in figura 40) che si posizionano sulle rotaie. Questi servono a bloccare la piattaforma rispetto alle rotaie, girando la manopola. Vedi figura 42.

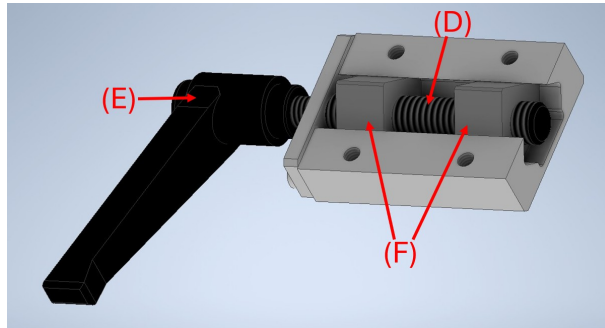


Figura 42: Modello 3D: morsetti per guide lineari, vista dal basso

Essi sono costituiti da una vite (D) interna che può svitarsi o avvitarsi girando la manopola (E). I due elementi (F) si avvicinano tra loro o si allontanano in base a come la vite viene mossa, cioè se viene avvitata o svitata.

Quando è montato sulle guide, tra i due elementi (F) si trova la rotaia e quindi quando si avvita abbastanza ruotando la manopola, i due elementi avvicinandosi tra loro vanno a bloccarsi con la rotaia. In questo modo il movimento della piattaforma di Stewart rispetto alle guide lineari viene bloccato.

Questi morsetti sono importanti perchè durante l'esperimento c'è bisogno che la piattaforma sia ben bloccata, così da garantire che i gusci restino precisamente in posizione.

3.2.4 Base superiore

Come per la base inferiore, la base superiore (figura 43) ha sei ribassamenti circolari per alloggiare i giunti sferici delle viti (gambe).

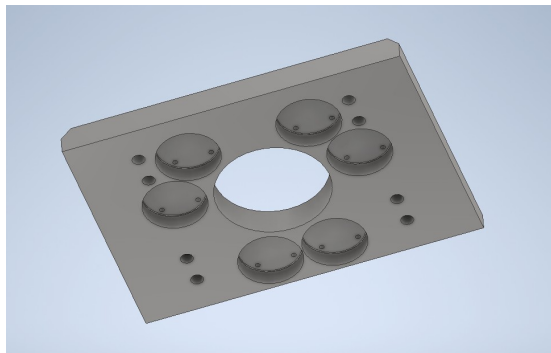


Figura 43: Modello 3D: base superiore, vista dal basso

Il foro grande al centro della base è stato realizzato per permettere il passaggio dei tubi dell'aria per gli attuatori pneumatici e dei cavi elettrici dei finecorsa e, inoltre, per alleggerirla dal punto di vista del materiale.

Sulla faccia superiore ci sono invece dei fori filettati che servono ad agganciare il blocco dell'attuatore sulla piattaforma tramite due squadre avvitare e allineate con quattro spine (paragrafo 2.5).

3.2.5 Viti micrometriche

Per le gambe della piattaforma di Stewart si è scelto di usare viti micrometriche perchè garantiscono elevata precisione e rigidità.

Nell'esperimento NUMEN, la regolazione della lunghezza delle gambe della piattaforma di Stewart avviene manualmente, avvitandole o svitandole.

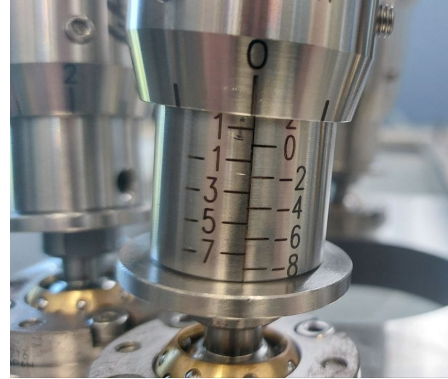
La scala graduata (figura 44) indica la variazione di lunghezza applicata alla vite rispetto alla posizione 0, per la quale si ha una lunghezza della vite di circa 141 mm.

Bisogna far coincidere una tacca del corsoio con la linea della scala graduata per poter impostare con precisione la variazione di lunghezza.

Un giro completo del corsoio corrisponde a 0,5 mm di avanzamento lineare. Tra una tacca del corsoio e la successiva ci sono 0,05 mm di avanzamento lineare, questo significa che si ha una risoluzione di 0,05 mm.



(a) vite micrometrica, posizione 0



(b) vite micrometrica, variazione lunghezza 2 mm

Figura 44: Regolazione viti micrometriche, scala graduata in mm

Viti piattaforma di sinistra

Le viti micrometriche della piattaforma dell'ottante sinistro sono state realizzate dalla ditta Weingrill. Sono composte da due viti montate concentricamente una nell'altra. Avvitando e svitando vengono mosse relativamente tra loro le due filettature.

Esse hanno un grano di bloccaggio ((A) in figura 45) per bloccare relativamente tra loro le due filettature.

La lunghezza di queste viti è pari a 141 mm. Si ha una posizione di zero, come si vede in figura 44, e si può regolare la lunghezza fino a +9 mm e -9 mm, con una corsa totale di 18 mm.

Effettuando delle misurazioni tramite la macchina di misura CMM si è potuto misurare la lunghezza reale della vite micrometrica, essa si può estendere fino a +9,25 mm e accorciarsi fino a -8,95 mm.

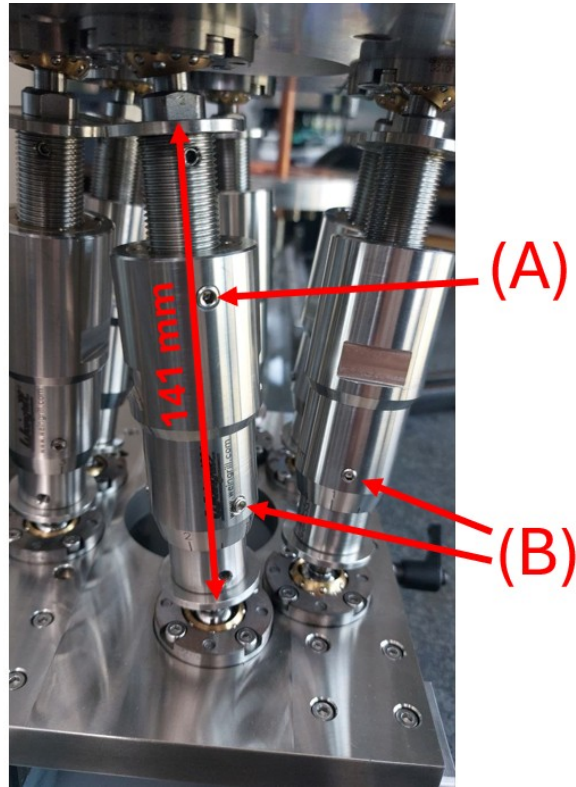


Figura 45: Vite micrometrica della piattaforma dell'ottante sinistro. (A) grano di bloccaggio, (B) grani supplementari

Queste sono le prime sei viti ad essere arrivate ai laboratori INFN di Torino e quando sono state caratterizzate è stato individuato un problema legato alla presenza di giochi relativi tra le due filettature.

Per risolvere questo problema sono stati effettuati tre fori filettati radiali per ogni vite, con un angolo di 120° tra ognuno di loro. In questi fori si avvitano tre grani ((B) in figura 45) che premono radialmente così che permettono di bloccare con maggior forza tra loro le due filettature interne.

Per evitare questo problema, per le sei viti della piattaforma di destra si è deciso di utilizzare un modello aggiornato delle viti micrometriche, in modo da avere una rigidezza maggiore. Ciò però ha comportato un aumento della loro lunghezza di circa 23 mm.

Viti piattaforma di destra

Anche le viti della piattaforma dell'ottante destro sono state realizzate dalla ditta Weingrill e, come il modello precedente, hanno passo 0,5 mm ed una risoluzione di 0,05 mm ed una lunghezza regolabile tra +9 mm e -9 mm.

Hanno una lunghezza pari a 164 mm, quindi sono 23 mm più lunghe rispetto al modello precedente.

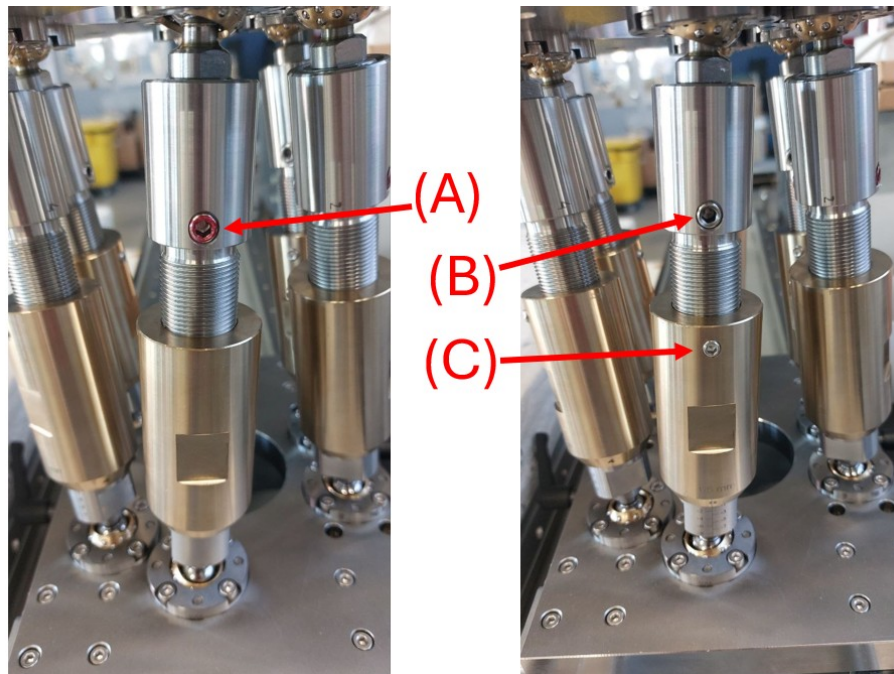


Figura 46: Vite micrometrica, piattaforma di destra

Inoltre anch'esse hanno un grano di bloccaggio ((A) in figura 46) delle due filettature. Hanno anche un grano di antisvitamento (C) e un grano di antirotazione (B) che si trova radialmente nella posizione opposta rispetto al grano di bloccaggio (A).

La piattaforma con queste viti è stata assemblata al Laboratorio di Torino, ma deve ancora essere caratterizzata.

3.2.6 Giunti sferici

Le viti sono collegate alle due basi mediante dei giunti sferici, sei per la base inferiore e sei per quella superiore.

Si utilizzano i giunti della ditta Hephaist, modello SRJ012C. Essi hanno alta rigidità e alta precisione, hanno una precisione di $\pm 2,5 \mu\text{m}$.

Ognuno di essi va fissato alla base della piattaforma di Stewart con quattro viti.



Figura 47: Giunto sferico Hephaist SRJ012C

4 Cinematica e misurazioni

4.1 Cinematica

La base superiore della piattaforma di Stewart si può muovere con sei gradi di libertà:

- Tre movimenti di traslazione: avanti/indietro (asse X), a destra/sinistra (asse Y) e su/giù (asse Z)
- Tre movimenti di rotazione: rollio γ (attorno all'asse X), beccheggio δ (attorno all'asse Y) e imbardata θ (attorno all'asse Z).

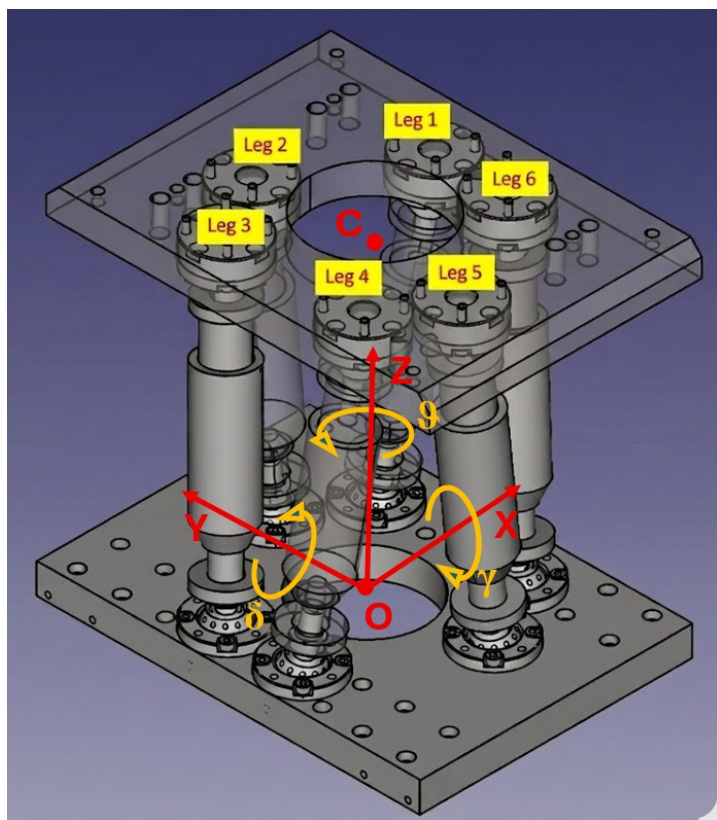


Figura 48: Piattaforma di Stewart, sistema di riferimento

La posizione della base superiore è regolata variando la lunghezza delle sei gambe. Ad ogni posizione e orientamento della base superiore corrisponde un'unica configurazione di lunghezze delle sei gambe.

4.2 Cinematica inversa

La cinematica inversa permette di ottenere la lunghezza delle gambe della piattaforma di Stewart partendo dalla posizione della base superiore.

Questo vuol dire che se si vuole che la base superiore sia in una certa posizione, tramite la cinematica inversa si va a calcolare la lunghezza che devono avere le gambe per ottenere la posizione richiesta.

Nel paragrafo successivo è descritta la procedura analitica della cinematica inversa; in appendice si trova il codice Matlab in cui viene applicata la cinematica inversa.

Per il sistema di riferimento di coordinate sono utilizzati gli assi X, Y, Z indicati in figura 48, con origine il centro della base inferiore della piattaforma di Stewart, cioè il punto O.

In particolare l'origine O è il centro della faccia superiore della base inferiore.

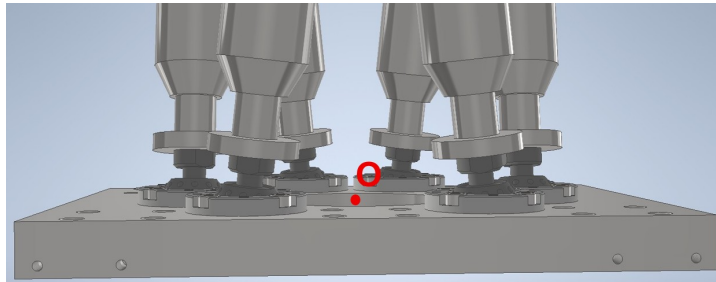


Figura 49: Piattaforma di Stewart: base inferiore con punto O

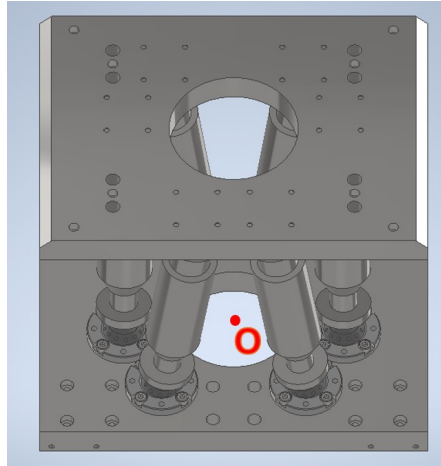


Figura 50: Piattaforma di Stewart: base inferiore con punto O, vista differente

Per descrivere la posizione della base superiore si utilizza il centro della faccia inferiore della base superiore, cioè il punto O' , e la matrice di rotazione della base superiore.

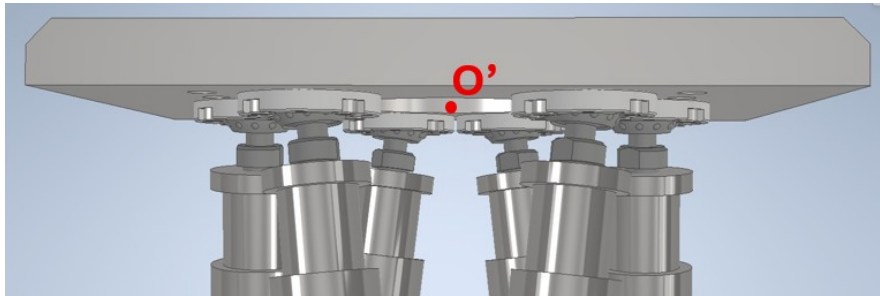


Figura 51: Piattaforma di Stewart: base superiore con punto O'

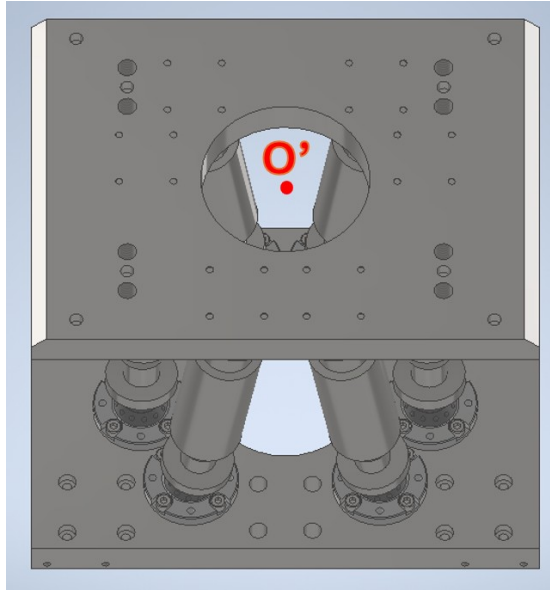


Figura 52: Piattaforma di Stewart: base superiore con punto O' , vista differente

Come input della cinematica inversa si utilizza quindi:

- coordinate X, Y, Z del punto O' (posizione desiderata)
- orientamento desiderato

Con orientamento desiderato si intende come la base superiore è ruotata nello spazio rispetto al sistema di riferimento XYZ . Viene indicato con gli angoli γ, δ, θ , come si vede in figura 48. Il verso di questi angoli segue la regola della mano destra, dato che stiamo usando un sistema di riferimento destrorso.

4.2.1 Approfondimento sull'orientamento della base superiore

Nella cinematica inversa è importante indicare nel modo giusto come è orientata la base superiore. Infatti la capacità di ruotare in ogni direzione è una caratteristica fondamentale della piattaforma di Stewart che permette di raggiungere con facilità e precisione la posizione voluta del guscio.

L'orientamento si può calcolare sia come angoli di Eulero che come matrice di rotazione.

All'interno della procedura analitica della cinematica inversa utilizziamo la matrice di rotazione della base superiore. Nel codice Matlab invece l'input è costituito dagli angoli di Eulero, che vengono convertiti tramite la funzione 'eul2rot' in matrice di rotazione, poi utilizzata nella procedura di calcolo.

L'orientamento della base superiore è calcolato rispetto al sistema XYZ, e dato che questo sistema è solidale con la base inferiore fissa, ciò vuol dire che la rotazione della base superiore è calcolata rispetto alla base inferiore.

Di conseguenza, se la base superiore avesse lo stesso orientamento di quella inferiore, come in figura 48, l'orientamento calcolato sarebbe nullo, cioè γ , δ , θ sarebbero zero.

Di seguito sono spiegati due esempi di rotazioni, entrambe per semplicità attorno ad uno solo dei tre assi, in modo da rendere chiaro il modo in cui vengono calcolate queste rotazioni.

esempio 1 Rotazione attorno ad asse Z

In figura 53 è rappresentata la piattaforma vista dall'alto. Si può vedere come gli assi X' e Y' , solidali alla base superiore, sono ruotati di 45° rispetto agli assi X e Y del sistema di riferimento. L'asse Z' coincide con Z .

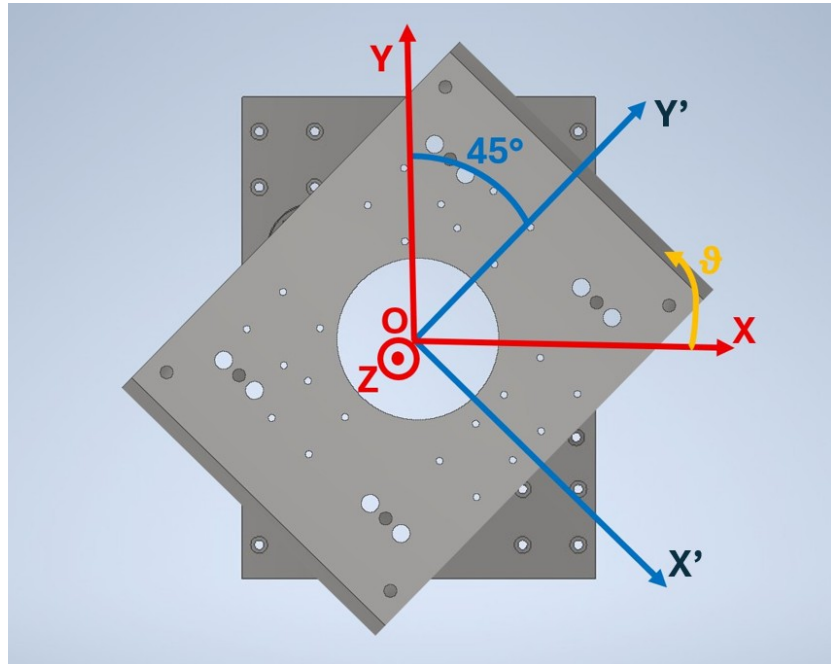


Figura 53: Rotazione della base superiore di -45° attorno ad asse Z

Questa è una rotazione attorno a Z, in quanto avviene nel piano XY, e la indichiamo con la lettera θ .

Quella in figura 53 è una rotazione di -45° rispetto all'asse Z, con il segno meno per la regola della mano destra.

Questo significa che gli angoli di Eulero per questa rotazione sono i seguenti:

$$\gamma = 0^\circ$$

$$\delta = 0^\circ$$

$$\theta = -45^\circ$$

esempio 2 Rotazione attorno ad asse X

In figura 54 la piattaforma è vista di lato. In questo caso gli assi Y' e Z', solidali alla base superiore, sono ruotati di 5° rispetto agli assi Y e Z del sistema di riferimento. L'asse X' coincide con X.

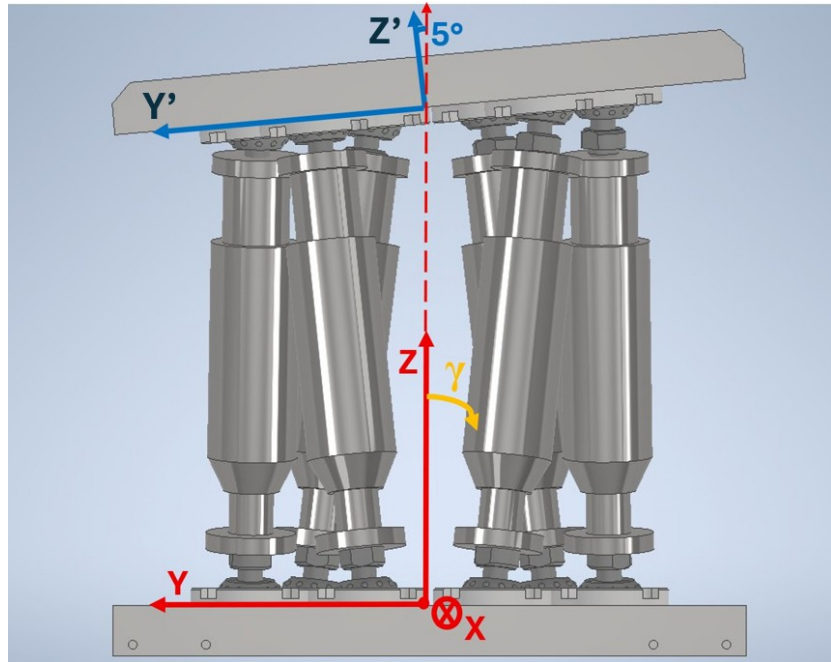


Figura 54: Rotazione della base superiore di -5° attorno ad asse X

In questo esempio la rotazione è attorno a X, in quanto avviene nel piano YZ, e la indichiamo con la lettera γ .

In particolare la rotazione di -5° rispetto all'asse X, con il segno meno per la regola della mano destra.

Questo significa che gli angoli di Eulero per questa rotazione sono i seguenti:

$$\gamma = -5^\circ$$

$$\delta = 0^\circ$$

$$\theta = 0^\circ$$

Angoli di Eulero e matrici di rotazione Vediamo come essi sono legati tra loro, in modo da capire come ricavare la matrice di rotazione a partire dagli angoli di Eulero.

Nel caso in cui gli angoli di eulero siano tutti nulli, la matrice di rotazione (R) sarà una matrice identità.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nel caso in cui si abbia una situazione simile ai due esempi visti in precedenza, cioè quando si ha una rotazione attorno ad un solo asse, dove quindi solo uno dei tre angoli di Eulero è diverso da 0, la matrice di rotazione R cambia in questo modo:

- quando avviene una rotazione γ attorno a X la matrice diventa:

$$R(X, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

- quando avviene una rotazione δ attorno a Y la matrice diventa:

$$R(Y, \delta) = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{bmatrix}$$

- quando avviene una rotazione θ attorno a Z la matrice diventa:

$$R(Z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nel caso in cui la rotazione avvenga attorno a due o tre assi contemporaneamente, si può ottenere la matrice di rotazione complessiva moltiplicando tra loro le tre matrici di rotazioni relative ai singoli assi:

$$R = \left[R(Z, \theta) \right] \left[R(Y, \delta) \right] \left[R(X, \gamma) \right]$$

In questo modo a partire dagli angoli di Eulero si può ottenere la matrice di rotazione che è in grado di descrivere un qualsiasi orientamento della base superiore della piattaforma di Stewart.

4.2.2 Procedura analitica cinematica inversa

In questo paragrafo è descritta la procedura analitica con cui si può calcolare la lunghezza delle gambe della piattaforma a partire dalla posizione e orientamento della base superiore.

Il procedimento riguarda una singola gamba, ma esso va ripetuto per tutte le sei gambe.

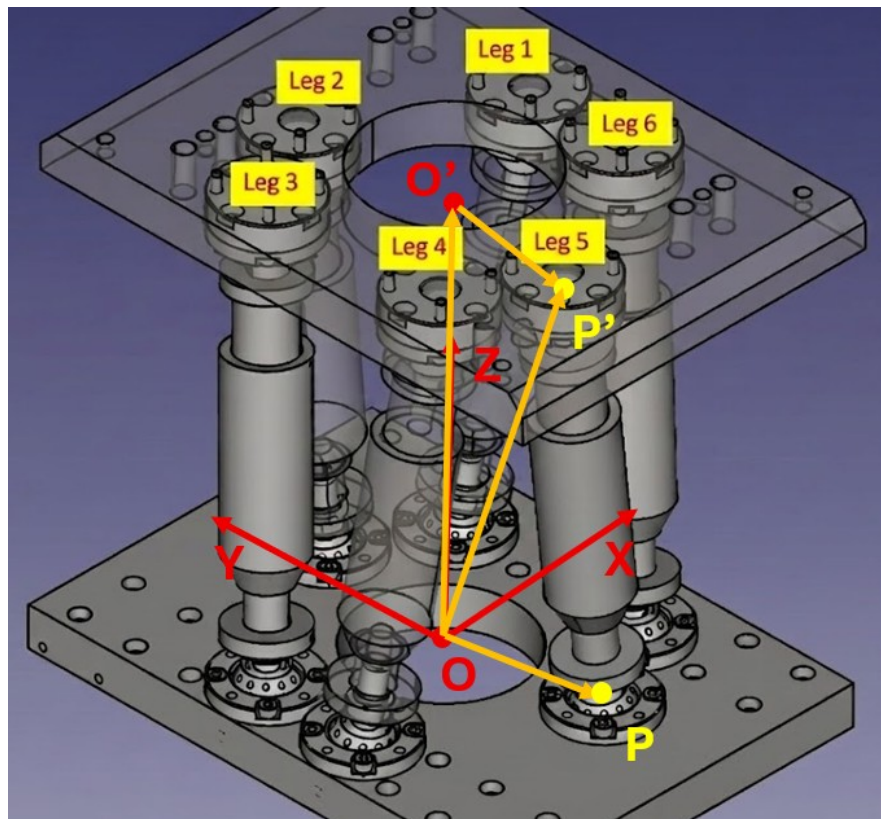


Figura 55: Cinematica inversa: sono riportati i vettori della gamba 5

- Si conosce il vettore $\overline{OP}$, in quanto è un parametro fisso. Esso va dal centro della base inferiore al punto in cui la gamba è solidale con la base inferiore. È il punto attorno al quale ruota il giunto sferico
- Si conosce il vettore $\overline{O'P'}$, anch'esso parametro fisso. Esso va dal centro della base superiore al punto in cui la gamba è solidale con la base superiore. È il punto attorno al quale ruota il giunto sferico
- Il vettore $\overline{OO'}$ corrisponde alle coordinate del punto O' (posizione desiderata)
- Il vettore $\overline{O'P'}$ è noto nel sistema di riferimento della base superiore, a differenza di $\overline{OP}$ e $\overline{OO'}$ che sono noti nel sistema XYZ della base inferiore. Bisogna quindi portare $\overline{O'P'}$ nel sistema di riferimento XYZ per poter eseguire operazioni tra questi vettori.

Per farlo si utilizza la matrice di rotazione della base superiore, che indica come è ruotato il sistema di riferimento della base superiore rispetto a XYZ.

- Così si ottiene il vettore $\overline{OP'}$ con la relazione:

$$\overline{OP'} = \overline{OO'} + [rot] \cdot \overline{O'P'}$$

- Il vettore $\overline{PP'}$ è il vettore che parte dalla base della gamba e arriva alla cima della gamba; in particolare dal centro del giunto sferico inferiore al centro del giunto sferico superiore.

Il suo modulo corrisponde alla lunghezza della gamba della piattaforma.

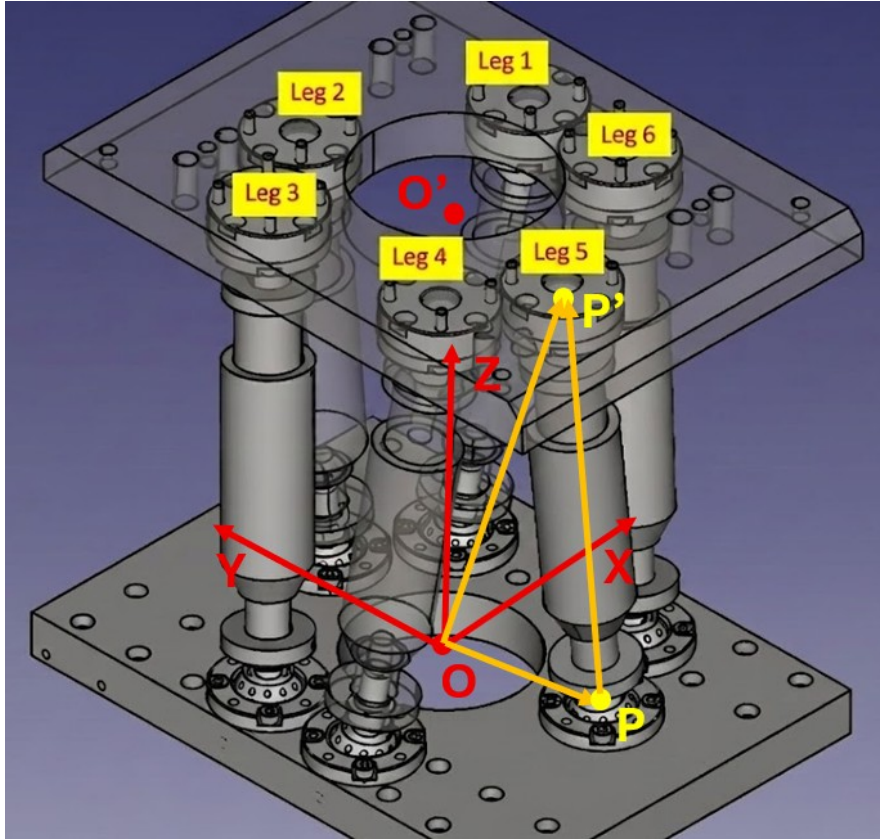


Figura 56: Cinematica inversa: sono riportati i vettori della gamba 5

- Tra i vettori esiste la seguente relazione:

$$\overline{OP} + \overline{PP'} = \overline{OP'}$$

Sono tutti definiti nel sistema di riferimento XYZ.

- L'unica incognita è il vettore $\overline{PP'}$. Si risolve l'equazione:

$$\overline{PP'} = \overline{OP'} - \overline{OP}$$

- Si calcola il suo modulo per ottenere la lunghezza l della gamba:

$$l = |\overline{PP'}|$$

- Si applica questo procedimento ad ogni gamba per ottenere le sei lunghezze.

4.3 Cinematica sistema completo

Quella vista finora è la cinematica che riguarda soltanto la piattaforma di Stewart. Per l'esperimento NUMEN c'è bisogno però di realizzare una cinematica inversa che riguardi l'intero sistema di movimentazione e posizionamento di un guscio.

In questo paragrafo è spiegato come è stata aggiornata la procedura analitica per includere la presenza del blocco dell'attuatore per l'ottante sinistro.

Come prima cosa si stabilisce in che modo viene definita la posizione del sistema che serve come input della cinematica inversa per arrivare infine alla lunghezza delle sei gambe.

Per descrivere questa posizione si è pensato di definire tre punti del guscio. Si utilizzano tre punti in quanto tre punti non allineati di un corpo rigido definiscono univocamente la sua posizione nello spazio.

Durante l'esperimento all'interno della sala sperimentale ai Laboratori Nazionali del Sud, andranno misurati tre punti della camera di scattering. La posizione di un guscio sarà quindi definita rispetto a questi tre punti, considerando che la posizione relativa tra camera di scattering e guscio è nota. In particolare bisogna misurare la posizione di questi tre punti rispetto alla base inferiore della piattaforma di Stewart corrispondente.

Per il lavoro di questa tesi sono stati scelti i centri di tre fori del guscio sinistro come punti per definire la sua posizione, vedi figura 57.

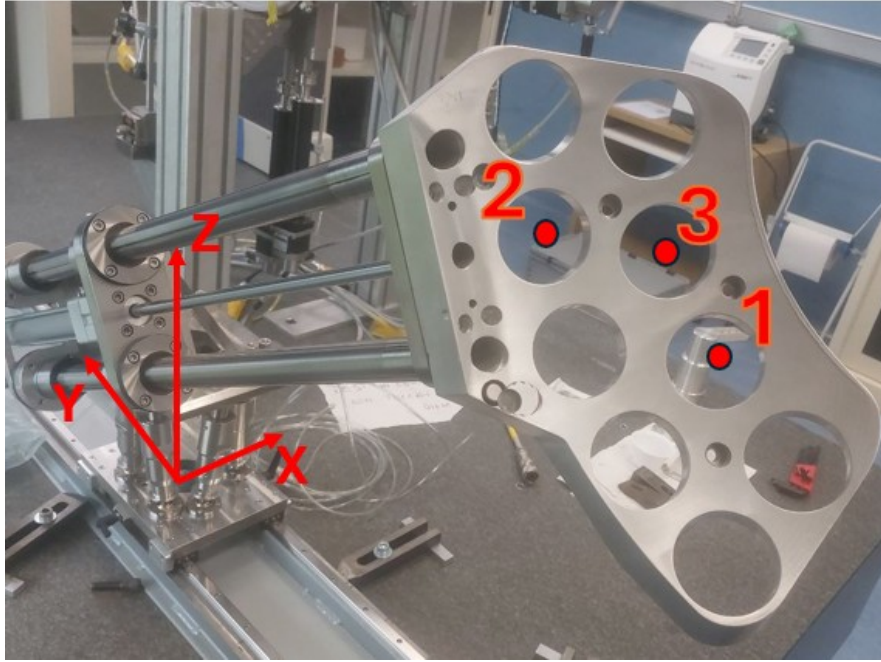


Figura 57: Punti del guscio misurati

Si è fatta questa scelta per facilità di misurazione di questi punti. Nell'esperimento ai LNS difficilmente si potranno misurare i centri dei fori, in quanto saranno presenti i rivelatori all'interno, quindi andranno misurati tre punti diversi.

4.3.1 Procedura analitica

La procedura analitica consiste nel ricondursi al caso della sola piattaforma di Stewart (paragrafo 4.2), quindi bisogna ottenere le coordinate di O' e la matrice di rotazione della base superiore della piattaforma. Da quel punto in poi si segue la procedura del paragrafo 4.2.2.

Rifacendosi a figura 58, si seguono i seguenti passaggi:

- Essendo input della cinematica, si conoscono i vettori $\overline{OC_1}$, $\overline{OC_2}$, $\overline{OC_3}$, che corrispondono alle coordinate dei punti C_1 , C_2 , C_3 nel sistema di riferimento XYZ con centro nella base inferiore della piattaforma (figura 57).

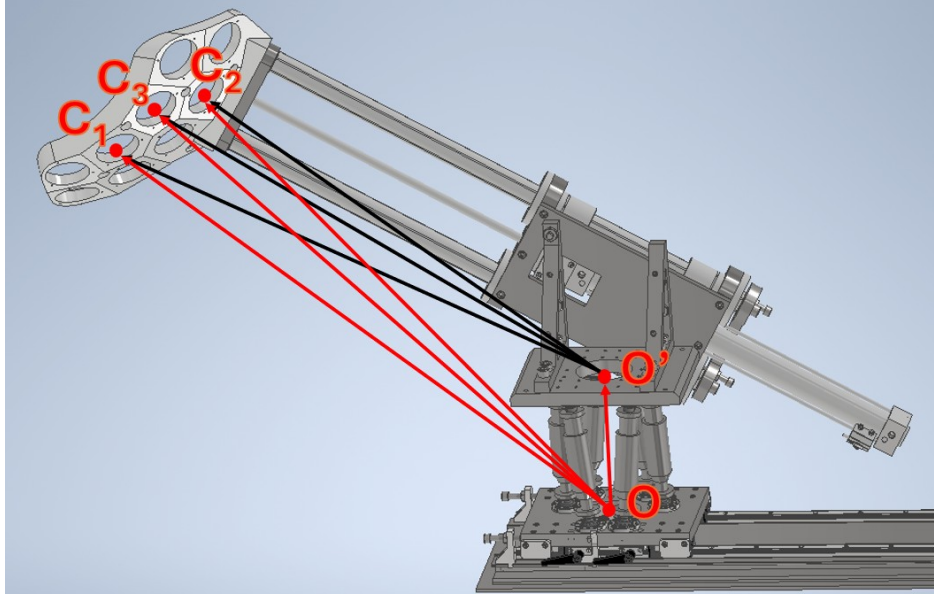


Figura 58: Modello 3D: sistema completo dell'ottante sinistro, con vettori della cinematica

- Si trova la matrice di rotazione usando questi tre punti con i seguenti passaggi:

- Calcolo vettore $\overline{C_2C_1} = C_2 - C_1$
- Calcolo vettore $\overline{C_3C_1} = C_3 - C_1$
- Calcolo vettore normale $\overline{C_{norm}}$:

$$\overline{C_{norm}} = \overline{C_2C_1} \times \overline{C_3C_1}$$

- Calcolo versore normale $\hat{n}$:

$$\hat{n} = \frac{\overline{C_{norm}}}{|\overline{C_{norm}}|}$$

- Si divide il vettore $\overline{C_2C_1}$ per il suo modulo, così da ottenere il versore $\hat{e}_1$:

$$\hat{e}_1 = \frac{\overline{C_2C_1}}{|\overline{C_2C_1}|}$$

- Si ottiene il versore $\hat{e}_2$ come prodotto vettoriale di $\hat{n}$ ed $\hat{e}_1$:

$$\hat{e}_2 = \hat{n} \times \hat{e}_1$$

- I tre versori ottenuti possono formare una matrice di rotazione nella quale essi costituiscono le colonne:

$$R = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 & \hat{e}_2 & \hat{n} \end{bmatrix}$$

- Questa matrice di rotazione R descrive l'orientamento del guscio rispetto al sistema di riferimento XYZ con origine nel centro della base inferiore della piattaforma di Stewart.
- Si conoscono i vettori $\overline{O'C_1}$, $\overline{O'C_2}$, $\overline{O'C_3}$, che corrispondono alle coordinate dei punti C_1 , C_2 , C_3 nel sistema di riferimento X'Y'Z' con centro nella base superiore della piattaforma (figura 59).

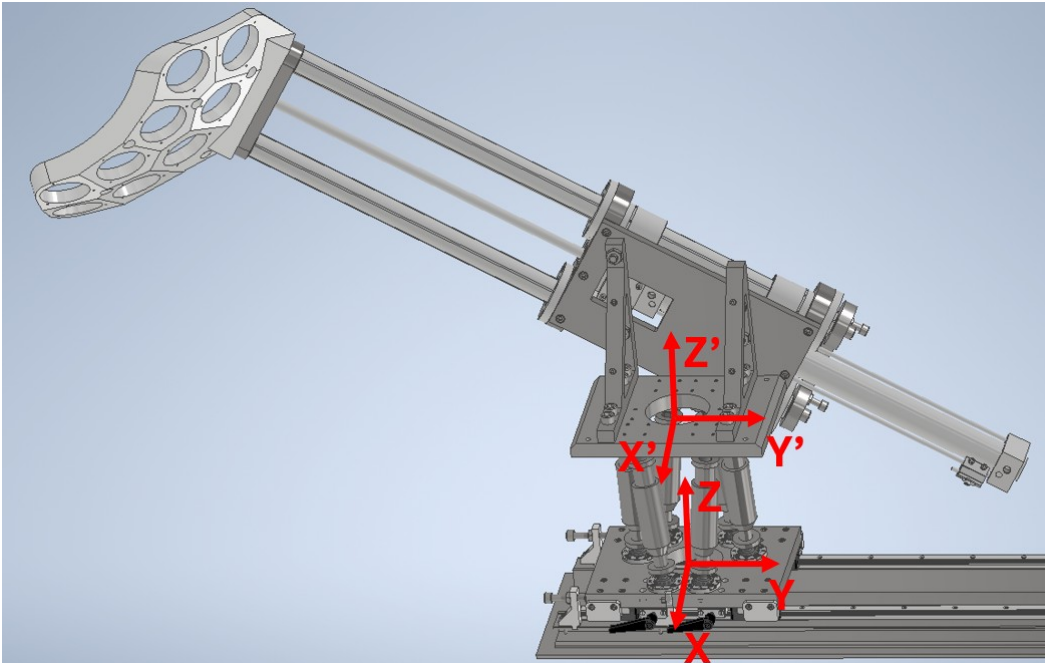


Figura 59: Sistemi di riferimento per il sistema completo dell'ottante sinistro

Essi si conoscono in quanto sono parametri del sistema che non cambiano quando si regola la piattaforma di Stewart. Cambiano quando il cilindro viene movimentato, ma non è una situazione che interessa la cinematica, dato che si considera sempre la posizione di lavoro del cilindro, cioè quando è completamente fuori.

Questi vettori $\overline{O'C_1}$, $\overline{O'C_2}$, $\overline{O'C_3}$ cambiano se si regolano le viti della piastra inferiore del blocco attuatore. Come descritto nel paragrafo 2.4.1, regolando queste viti si cambia la posizione assiale del cilindro. Quindi in questo caso cambierebbe la posizione di lavoro del cilindro rispetto alla base superiore della piattaforma di Stewart, di conseguenza varierebbero i vettori $\overline{O'C_1}$, $\overline{O'C_2}$, $\overline{O'C_3}$.

Questo significa che i vettori $\overline{O'C_1}$, $\overline{O'C_2}$, $\overline{O'C_3}$ si ottengono misurando il sistema, se poi si regolano le due viti dell'attuatore allora il sistema va rimisurato per ottenere i nuovi vettori $\overline{O'C_1}$, $\overline{O'C_2}$, $\overline{O'C_3}$ da utilizzare nella procedura analitica.

- Quindi si conoscono le coordinate dei punti C_1 , C_2 , C_3 nel sistema di riferimento $X'Y'Z'$ con centro nella base superiore della piattaforma, e li chiamiamo c_1 , c_2 , c_3 per distinguerli da quelli del sistema di riferimento XYZ .
- Si calcola la matrice di rotazione con lo stesso procedimento di prima:

- Calcolo vettore $\overline{c_2c_1} = c_2 - c_1$
- Calcolo vettore $\overline{c_3c_1} = c_3 - c_1$
- Calcolo vettore normale $\overline{c_{norm}}$:

$$\overline{c_{norm}} = \overline{c_2c_1} \times \overline{c_3c_1}$$

- Calcolo versore normale $\hat{m}$:

$$\hat{m} = \frac{\overline{c_{norm}}}{|\overline{c_{norm}}|}$$

- Si divide il vettore $\overline{c_2c_1}$ per il suo modulo, così da ottenere il versore $\hat{i}_1$:

$$\hat{i}_1 = \frac{\overline{c_2c_1}}{|\overline{c_2c_1}|}$$

- Si ottiene il versore $\hat{i}_2$ come prodotto vettoriale di $\hat{m}$ ed $\hat{i}_1$:

$$\hat{i}_2 = \hat{m} \times \hat{i}_1$$

- I tre versori ottenuti possono formare una matrice di rotazione nella quale essi costituiscono le colonne:

$$Q = \begin{bmatrix} \hat{i}_1 & \hat{i}_2 & \hat{m} \end{bmatrix}$$

- Questa matrice di rotazione Q descrive l'orientamento del guscio rispetto al sistema di riferimento $X'Y'Z'$ con origine nel centro della base superiore della piattaforma di Stewart.

- A questo punto si hanno due matrici di rotazione R e Q calcolate per gli stessi punti ma in diversi sistemi di riferimento.

Si deve calcolare la matrice R_S che è la matrice di rotazione del sistema di riferimento $X'Y'Z'$ rispetto al sistema XYZ .

Per le leggi della robotica vale la formula:

$$R = R_S \cdot Q$$

- Si risolve la formula per ottenere R_S :

$$R_S = R \cdot Q^T$$

Questa è la matrice di rotazione della base superiore della piattaforma di Stewart rispetto al sistema di riferimento della base inferiore.

- Ottenuta la matrice di rotazione si possono calcolare le coordinate di O' rispetto a XYZ.

Come si vede da figura 58 si può utilizzare uno qualsiasi dei tre punti (noi usiamo C₁) per fare una differenza tra vettori e ottenere $\overline{OO'}$.

Bisogna considerare che del vettore $\overline{O'C_1}$ noi conosciamo le coordinate rispetto a X'Y'Z', quindi bisogna moltiplicarlo per la matrice di rotazione R_S per ottenerlo nel sistema di riferimento XYZ e poterlo sommare con gli altri vettori:

$$\overline{OC_1} = \overline{OO'} + R_S \cdot \overline{O'C_1}$$

- Si ottiene $\overline{OO'}$:

$$\overline{OO'} = \overline{OC_1} - R_S \cdot \overline{O'C_1}$$

- Adesso si hanno sia le coordinate di O' rispetto a XYZ che la matrice di rotazione della base superiore, quindi da qui in poi si può seguire la procedura di paragrafo 4.2.2 per ottenere la lunghezza delle gambe della piattaforma di Stewart.

4.3.2 Codice Matlab cinematica del sistema completo

È stato sviluppato un codice su Matlab che integra questa procedura analitica, si trova in Appendice.

Nel codice si inserisce come input le coordinate dei punti C₁, C₂, C₃ e come output si ottengono le lunghezze delle gambe.

Tra i parametri ci sono i punti c₁, c₂, c₃ che vanno rimisurati e cambiati nel caso vengano regolate le viti della piastra inferiore dell'attuatore.

5 Sistema di controllo per la movimentazione dello shell

Nell'esperimento NUMEN che verrà condotto ai Laboratori Nazionali del Sud la movimentazione dei gusci sarà controllata con un PLC che permetta di comandare il movimento degli attuatori a distanza, cioè dall'esterno dell'area sperimentale dello spettrometro MAGNEX.

Il sistema di controllo viene realizzato e provato nel laboratorio dell'INFN di Torino usando un PLC della ditta Crouzet.

5.1 Descrizione PLC

Il PLC di Crouzet si vede in figura 60 ed è stato utilizzato per verificare il funzionamento del sistema di controllo con i due sistemi di movimentazione dell'ottante destro e dell'ottante sinistro.

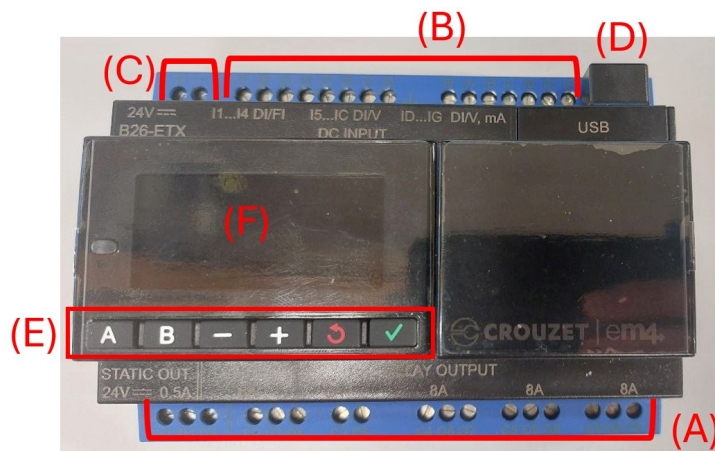


Figura 60: PLC di Crouzet

È costituito dai seguenti elementi:

- Collegamenti per output (A)
- Collegamenti per input (B)

- Collegamenti per alimentazione del PLC (C)
- Collegamento al PC tramite USB (D)
- Pulsanti (E)
- Schermo (F)

I pulsanti sono sei: +, -, A, B, verde e rosso. Di questi solo i primi quattro si possono usare come comandi all'interno di un programma per la movimentazione con il PLC. Il verde e il rosso infatti servono ad aprire impostazioni del menu interno del PLC.

Il programma per la movimentazione dei due attuatori, dell'ottante destro e di quello sinistro, è stato progettato in modo da poter comandare il loro movimento di fuoriuscita e rientro utilizzando solo i quattro tasti +, -, A, B.

Per i collegamenti di output, input e alimentazione del PLC si utilizzano cavi elettrici.

L'alimentazione è collegata ad un alimentatore da 24 V.

Agli output si devono collegare i cavi elettrici del manifold, in cui si trovano le elettrovalvole.

Agli input si devono collegare i finecorsa degli attuatori e i tasti di emergenza e di comando manuale.

5.2 Manifold

Il manifold, figura 62, è un elemento costituito da cinque elettrovalvole, a cui se ne possono aggiungere altre sette arrivando ad un totale di dodici.

Esse sono elettrovalvole pneumatiche a cassetto 5/3, cioè 5 vie e 3 posizioni, figura 61.

Sono valvole a centri chiusi, in quanto nella posizione centrale tutti i condotti sono chiusi, quindi l'aria non passa e resta nel cilindro.

Si hanno inoltre due posizioni di funzionamento (o di lavoro) per iniettare aria in una o nell'altra camera del cilindro.

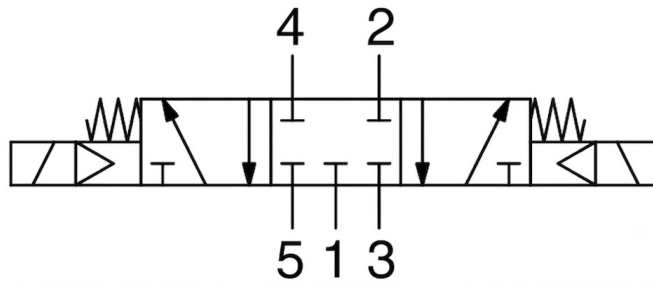


Figura 61: Valvola 5/3 a centri chiusi

La via 1 è l'entrata dell'aria, ed è unica e comune a tutte le valvole, è indicata con (A) in figura 62.

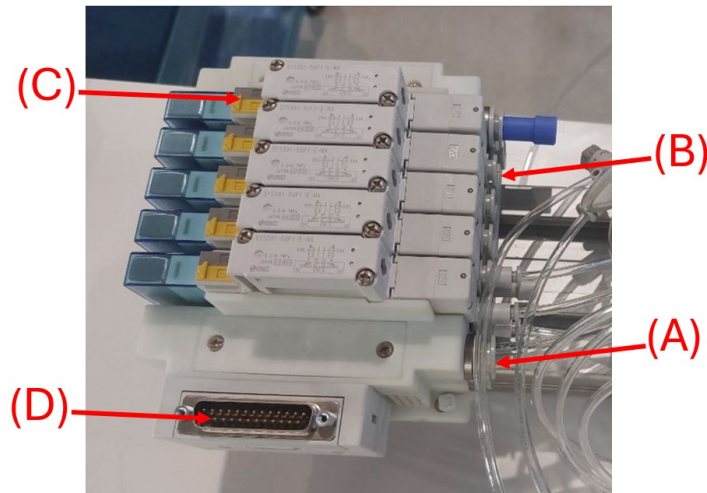


Figura 62: Manifold con elettrovalvole

Le vie 2 e 4 sono le vie di utilizzo, da cui esce l'aria che viene iniettata nel cilindro. Ogni elettrovalvola ha le sue e sono indicate con (B) in figura 62.

Le vie 3 e 5 sono gli scarichi.

Per quanto riguarda il comando delle valvole si hanno sia i comandi manuali, che sono le levette gialle e grigie indicate con (C) in figura 62, sia il comando elettrico tramite la porta (D) in figura.

A questa porta si collega un cavo che al suo interno ha 25 cavetti elettrici, ognuno dei quali serve per una posizione di lavoro della singola elettrovalvola; quindi per ogni elettrovalvola si hanno due cavetti per le sue due posizioni possibili.

Dato che i cavetti sono 25, il manifold potrebbe comandare 12 elettrovalvole, che eventualmente possono essere aggiunte ad esso.

Questi cavetti vanno collegati alle uscite output del PLC ((A) in figura 60). Con questo collegamento si potranno quindi comandare le valvole tramite il PLC.

5.3 Finecorsa

Ogni attuatore cilindrico ha due finecorsa, uno per quando il cilindro è completamente esteso, l'altro per quando è completamente ritirato.

In figura 63 si può vedere un finecorsa. Nel Laboratorio di Torino ci sono i quattro finecorsa per i due ottanti, che sono tutti identici tra loro.



Figura 63: Finecorsa per cilindro pneumatico

Essi sono sensori allo stato solido resistenti ai campi magnetici. Vanno collegati elettricamente con i loro cavi al PLC come segnale di input.

Si inseriscono su un'asta parallela alla canna dell'attuatore, come si vede in figura 64. Hanno un led che si illumina di colori diversi in base al segnale che riceve. Quando il pistone è molto vicino si illumina di colore rosso, quando arriva nella posizione ottimale rispetto al sensore diventa verde, indicando che si trova nella posizione di finecorsa. Quindi quando è verde il finecorsa dà il segnale al PLC.



Figura 64: Due finecorsa montati sull'attuatore

5.4 Regolatore di flusso con valvole di non ritorno

Nel collegamento pneumatico tra la camera del cilindro e l'uscita dell'elettrovalvola si utilizza un regolatore di flusso con valvola di non ritorno, si può vedere in figura 65.



Figura 65: Regolatore di flusso

Dallo schema della valvola si vede che può regolare il flusso solo in una delle due direzioni.

Esso serve per regolare il flusso in uscita dalla camera del cilindro; più si chiude più il flusso in uscita diminuisce. Se si chiude completamente l'aria nella camera non può più fuoriuscire. Invece il flusso in ingresso nella camera del cilindro non è influenzato, non è limitato in alcun modo.

Per capire perchè serve limitare il flusso in uscita dalla camera vediamo la situazione nel caso di due camere A e B di un cilindro.

Quando si comanda il flusso in entrata nella camera A e il pistone inizia a muoversi, l'aria nella camera B viene spinta fuori. Se non ci fosse alcuna limitazione la pressione nella camera B arriverebbe subito ad essere quella atmosferica, molto inferiore alla pressione in A, e quindi la forza che movimentata il cilindro sarebbe troppo elevata, portando il cilindro a muoversi troppo velocemente ed a scatti, esso non avrebbe un movimento fluido.

Invece utilizzando il regolatore di flusso, dato che il flusso in uscita viene costretto nella strozzatura controllata da una valvola di non ritorno, la pressione nella camera B rimarrebbe a valori più vicini a quella di A, quindi il movimento del pistone sarebbe più lento e fluido, dato che non ci sarebbe una differenza di pressione troppo elevata sulle sue due facce.

Per questo ogni cilindro ha due valvole di non ritorno, una per camera: per poter regolare la velocità in entrambe le direzioni.

5.5 Altri elementi del sistema di controllo degli attuatori

Come parte del sistema di controllo degli attuatori si hanno anche il tasto di emergenza e l'interruttore per il comando manuale.

Essi vanno collegati entrambi come input al PLC.

L'interruttore per il comando manuale serve per passare dal normale programma automatico del PLC ad un programma a controllo completamente manuale; i programmi sono approfonditi nei paragrafi successivi.

Il tasto di emergenza se premuto interrompe il movimento degli attuatori per ragioni di sicurezza.

In figura si può vedere il sistema di controllo utilizzato al Laboratorio Tecnologico di Torino.

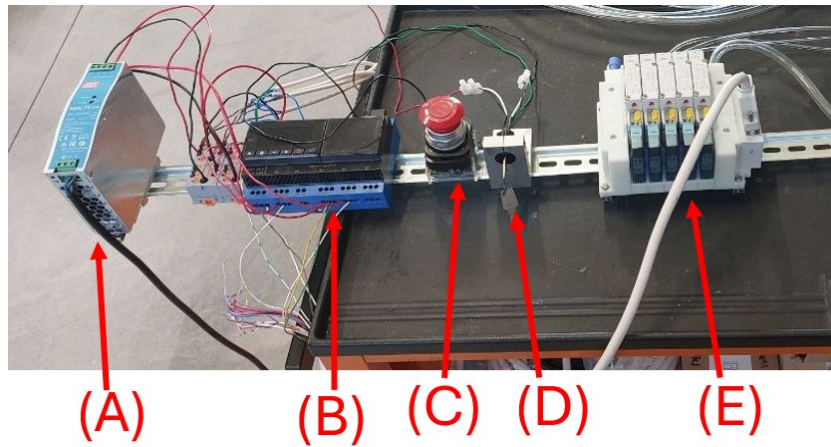


Figura 66: Sistema di controllo

- Alimentatore (A)
- PLC (B)
- Pulsante di emergenza (C)
- Interruttore di comando manuale (D)
- Manifold (E)

5.6 Struttura sistema di controllo

In figura 67 è presente lo schema con gli elementi del sistema di controllo e come sono stati collegati tra loro.

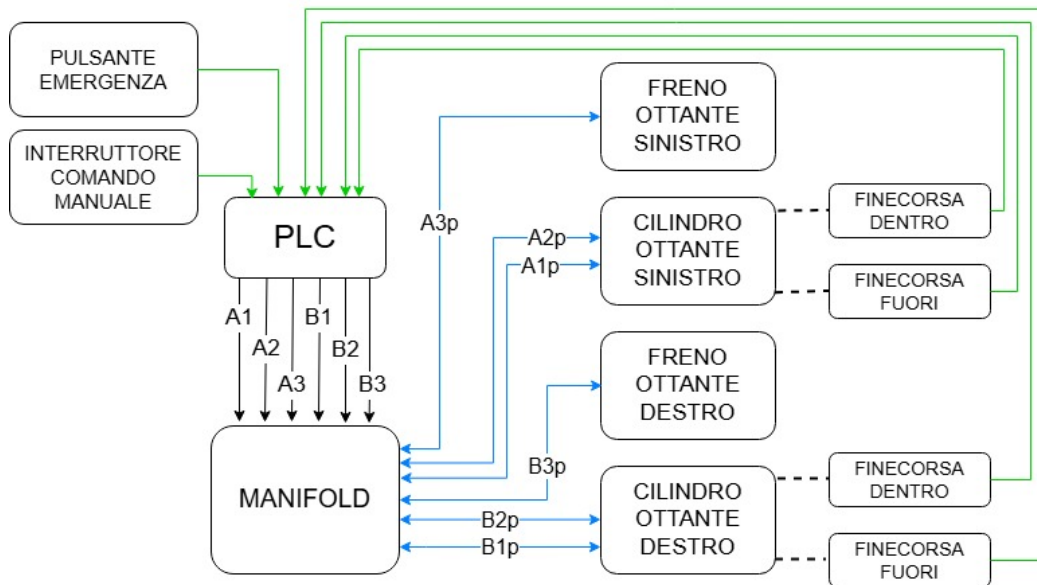


Figura 67: Collegamenti tra elementi del sistema di controllo

I collegamenti realizzati sono i seguenti:

- In nero collegamenti con cavi elettrici per output dal PLC:
 - A1 segnale di fuoriuscita del cilindro dell'ottante sinistro.
 - A2 segnale di rientro del cilindro dell'ottante sinistro
 - A3 segnale di aria per il freno del cilindro dell'ottante sinistro
 - B1 segnale di fuoriuscita del cilindro dell'ottante destro.
 - B2 segnale di rientro del cilindro dell'ottante destro
 - B3 segnale di aria per il freno del cilindro dell'ottante destro
- In blu collegamenti tramite cavi pneumatici da elettrovalvole:
 - A1p collegamento pneumatico con camera per la fuoriuscita del cilindro dell'ottante sinistro, e regolato con regolatore di flusso.
 - A2p collegamento pneumatico con camera per il rientro del cilindro dell'ottante sinistro, e regolato con regolatore di flusso.

- A3p collegamento pneumatico con il freno dell'ottante sinistro.
- B1p collegamento pneumatico con camera per la fuoriuscita del cilindro dell'ottante destro, e regolato con regolatore di flusso.
- B2p collegamento pneumatico con camera per il rientro del cilindro dell'ottante destro, e regolato con regolatore di flusso.
- B3p collegamento pneumatico con il freno dell'ottante destro.
- In verde collegamenti con cavi elettrici per input al PLC:
 - cavi elettrici per i 2 finecorsa di rientro e i 2 finecorsa di fuoriuscita
 - cavi elettrici per pulsante di emergenza
 - cavi elettrici per interruttore per comando manuale

5.7 Programma PLC

Per movimentare i cilindri tramite PLC bisogna usare delle combinazioni di pulsanti, che sono indicate in figura 68

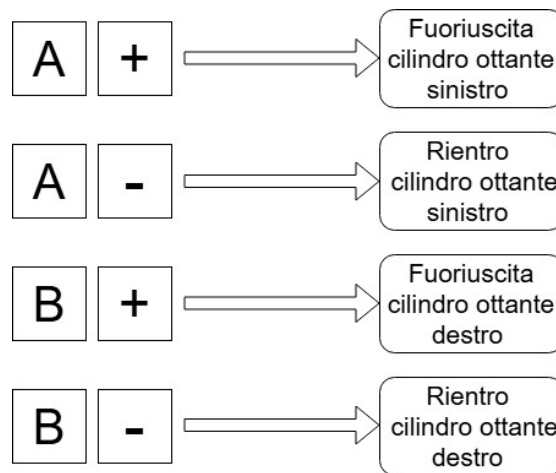


Figura 68: Pulsanti da premere sul PLC per movimentare cilindri

Quindi è stato realizzato un programma per il PLC che permette questo funzionamento, creato con l'eseguibile per Windows CrouzetSoft.

In Appendice è presente l'immagine del programma realizzato su CrouzetSoft. La movimentazione desiderata per gli ottanti dello shell ha queste caratteristiche:

- Gli attuatori devono poter muoversi indipendentemente l'uno dall'altro; ciò vuol dire che le elettrovalvole devono poter essere comandate contemporaneamente e indipendentemente l'una dall'altra.
- Per muovere un attuatore, e quindi per dare il comando ad una valvola, bisogna premere contemporaneamente due tasti del PLC (figura 68).

Esempio: per far uscire il cilindro sinistro bisogna premere contemporaneamente i pulsanti A e +.

Questo lo si fa per motivi di sicurezza, per evitare che premendo fortuitamente un pulsante si causi un movimento non voluto del sistema.

- I cilindri possono trovarsi solo in due posizioni:
 - la posizione di lavoro, cioè quando è completamente esteso
 - la posizione di riposo, cioè quando è completamente ritirato.

Ci si riferisce a queste posizioni come posizioni di finecorsa, in quanto sono le posizioni lette dai sensori.

- Rispettando il punto precedente, si deve fare in modo che quando si dà il comando premendo due pulsanti e il movimento inizia, esso deve continuare anche se i pulsanti vengono rilasciati, e deve muoversi fino ad arrivare alla posizione delimitata dal sensore di finecorsa.
- I sensori di finecorsa che segnalano che il cilindro si trova a finecorsa si usano come input del programma.

Dato che, come visto al punto precedente, il cilindro continua il movimento in automatico fino alla posizione di finecorsa, quando in input arriva il segnale di finecorsa la movimentazione si considera conclusa e quindi la valvola che fornisce aria alla camera viene disattivata.

- Quando si premono i due pulsanti per iniziare una movimentazione, il freno di quel cilindro movimentato deve automaticamente disattivarsi, cioè l'elettrovalvola che manda l'aria nel freno deve attivarsi e far fluire l'aria al freno.

Inoltre quando si arriva al finecorsa, il freno deve riattivarsi automaticamente, cioè l'elettrovalvola deve interrompere la fornitura di pressione di aria.

- Riguardo al punto precedente, ci sono le seguenti precisazioni da fare:

- Inizio movimentazione:

Quando si dà il comando di movimentazione di un cilindro, deve prima attivarsi l'elettrovalvola del freno, e qualche frazione di secondo dopo deve attivarsi quella che dà l'aria alla camera del cilindro.

Questo perchè quando l'aria entra nella camera del cilindro esso deve essere già in grado di muoversi. Se ciò non avvenisse, cioè se quando entra aria nella camera del cilindro il freno fosse ancora attivo, la pressione nella camera aumenterebbe in quanto la camera non si espanderebbe (a causa del freno) e quindi quando successivamente il freno si disattiva la grande differenza di pressione tra le due camere porterebbe ad un movimento impulsivo del cilindro, che porta a delle vibrazioni.

Invece l'obiettivo è avere un movimento fluido e non a scatti.

- Fine movimentazione:

Quando il cilindro muovendosi arriva a finecorsa c'è bisogno che il freno si attivi qualche frazione di secondo prima rispetto alla disattivazione della valvola che manda aria alla camera del cilindro.

Questo perchè il freno deve bloccare il cilindro nella posizione di massima estensione.

Infatti se avvenisse il contrario, cioè se la valvola che manda aria alla camera si disattivasse prima dell'attivazione del freno, allora nel momento in cui l'aria non viene più fornita alla camera il cilindro

potrebbe muoversi leggermente nel verso opposto a causa del peso del guscio, e non si troverebbe esattamente nella posizione voluta.

Quindi c'è bisogno di bloccare con il freno il cilindro prima che venga a mancare l'aria nella camera.

Per regolare le attivazioni (o disattivazioni) dei freni come qui indicato si utilizzano dei temporizzatori nel programma in PLC.

- Per iniziare una movimentazione c'è bisogno del segnale di input in arrivo dal finecorsa del cilindro, che ci dice che il cilindro è in una posizione di finecorsa e quindi può muoversi verso l'altra posizione di finecorsa.

Se il segnale del finecorsa non c'è la movimentazione non parte.

- Bisogna utilizzare un pulsante di emergenza, che è input del programma, che quando viene premuto disattiva tutte le valvole. Ciò comporta quindi anche un'attivazione dei freni. I cilindri smettono immediatamente di muoversi, mettendo il sistema in sicurezza.
- In seguito all'utilizzo del pulsante di emergenza, per riprendere il movimento dei cilindri c'è bisogno di un altro programma che non preveda la movimentazione automatica fino a finecorsa, che chiamiamo "programma di ripristino".

C'è bisogno di questo programma che prevede una movimentazione differente innanzitutto perchè il cilindro, in seguito all'interruzione per emergenza, potrebbe trovarsi in una posizione intermedia, non di finecorsa, e quindi la movimentazione con il programma normale non potrebbe partire. Questo perchè, come scritto nei punti precedenti, la movimentazione parte solo se abbiamo un segnale dal finecorsa.

Questo "programma di ripristino" ha quindi le seguenti caratteristiche:

- Per comandare una movimentazione bisogna premere contemporaneamente due tasti del PLC, ma a differenza del programma normale, la movimentazione continua solo fin quanto entrambi questi tasti vengono premuti.

Se almeno uno dei due tasti viene rilasciato il movimento si interrompe.

- Per far partire una movimentazione non c'è bisogno del segnale di finecorsa, ma bisogna solo premere i tasti.
- Per attivare questo programma di ripristino bisogna usare l'interruttore di comando manuale, (D) in figura 66. Dopo che la situazione è tornata a posto e il cilindro si trova in una posizione di finecorsa si può tornare al programma iniziale disattivando la leva di comando manuale.

5.8 Verifica del funzionamento del sistema di controllo

Il sistema di controllo è stato completamente montato e collegato al Laboratorio Tecnologico di Torino.

È stato utilizzato il programma PLC descritto precedentemente.

Sono state effettuate delle prove di funzionamento che hanno dato risultati corretti ed accettabili, confermando il corretto funzionamento del sistema di controllo e degli attuatori pneumatici.

6 Misurazioni e Risultati

6.1 Macchina di misura CMM

Le misurazioni per il lavoro di questa tesi sono state effettuate con una macchina di misura a coordinate CMM, che si trova presso il Laboratorio Tecnologico dell'INFN di Torino.

Essa utilizza un tastatore a forma di sfera che tocca fisicamente l'oggetto da misurare per individuare con precisione i suoi punti.

La precisione della CMM è indicata dalla seguente formula per il massimo errore possibile:

$$MPE = \pm(5 + 4 \cdot L/1000)$$

dove MPE è in μm , 5 è in μm e L è in mm.

- MPE è il massimo errore possibile che può commettere la macchina quando si misura una superficie, quindi un piano, di un oggetto.
- L è la distanza tra i due punti più distanti sulla stessa superficie che vengono tastati.

Ad esempio: il lato più lungo della piattaforma di Stewart è 225 mm. Questo significa che il massimo errore possibile nella misura di quella superficie è:

$$MPE = \pm(5 + 4 \cdot 225/1000) = \pm 5,9\mu\text{m}$$

È un valore abbastanza piccolo rispetto all'errore accettabile del progetto al quale contribuiranno i risultati delle misurazioni.

6.2 Misurazioni sulla piattaforma di Stewart

Durante il lavoro svolto per questa tesi, sono state effettuate numerose misurazioni sulla piattaforma di Stewart dell'ottante sinistro per verificare la precisione della riproducibilità della piattaforma e il corretto funzionamento della sua cinematica.

6.2.1 Definizione delle configurazioni delle gambe

Abbiamo visto precedentemente che le viti (le gambe della piattaforma) hanno una scala graduata che va da -9mm a +9mm, ciò significa che non si può impostare direttamente la lunghezza della gamba, ma si imposta una variazione di lunghezza rispetto alla posizione 0 della scala graduata.

Un insieme di variazioni di lunghezza delle sei gambe lo definiamo configurazione delle gambe.

La stessa configurazione deve avere le stesse variazioni di lunghezza per ogni singola vite.

Ad esempio definiamo come configurazione 1 la seguente:

leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
-2,5	2	-2,5	0	0	0

Figura 69: Configurazione 1 delle gambe, in mm

E come configurazione 2:

leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
-2,5	-2,5	2	0	0	0

Figura 70: Configurazione 2 delle gambe, in mm

Le due configurazioni sono diverse, in quanto le variazioni di lunghezza della gamba 2 e della gamba 3 non sono uguali.

6.2.2 Procedura per le misurazioni sulla piattaforma di Stewart

Prima di effettuare la misurazione si sceglie una certa configurazione di variazioni di lunghezza delle gambe da impostare.

Ad esempio: tutte le viti impostate su 0

Poi si esegue la misurazione come descritto qui di seguito:

- Si misurano i piani laterali AA, BB, CC, DD e il piano superiore H della base della piattaforma (figura 71). Lo si fa toccando il singolo piano con il tastatore in sei punti diversi.

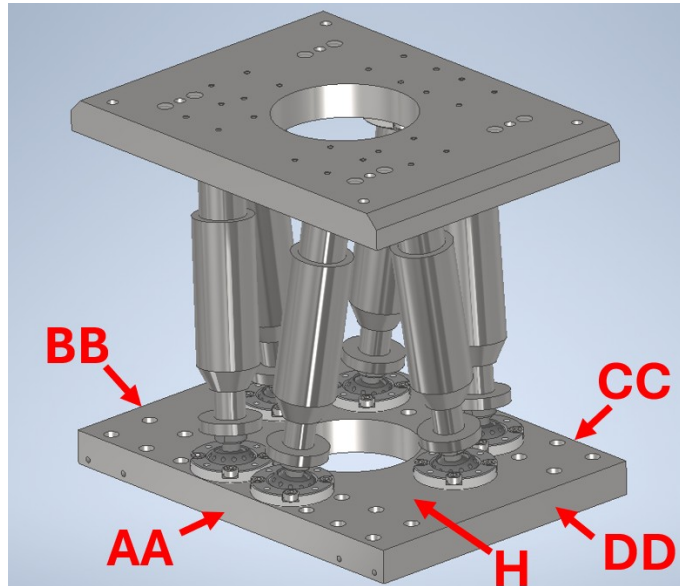


Figura 71: Piani base inferiore della piattaforma di Stewart

- Si trova il piano F come piano medio tra BB e DD, e il piano G come piano medio tra AA e CC.
- Si ottiene l'origine O del sistema di coordinate come intersezione dei piani F, G e H.

Si trovano gli assi del sistema di coordinate: X perpendicolare al piano G, Y perpendicolare a F, Z perpendicolare ad H (figura 72).

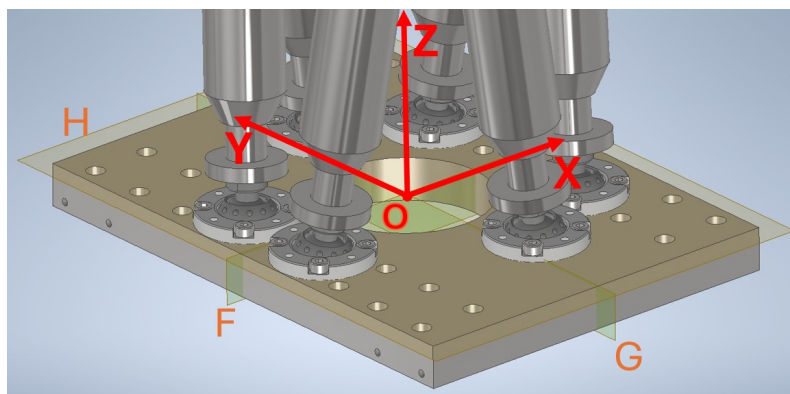


Figura 72: Sistema di riferimento XYZ

- Si misurano i quattro piani laterali della base superiore AA' , BB' , CC' , DD' e il piano inferiore H' della base superiore (figura 73).

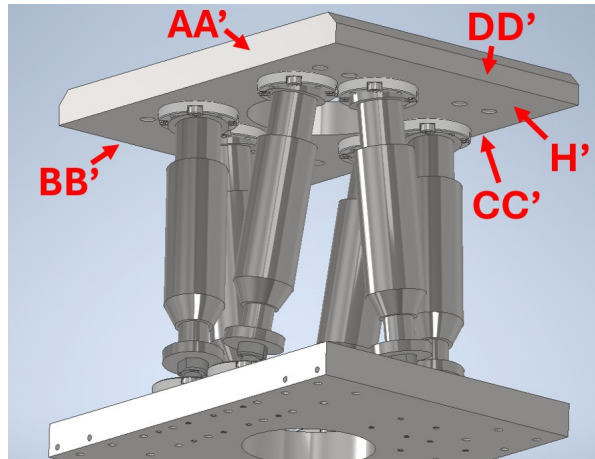


Figura 73: Piani della base superiore della piattaforma di Stewart

- Si trova il piano F' come piano medio tra BB' e DD' , e il piano G' come piano medio tra AA' e CC' .
- Si ottiene il punto O' come intersezione dei piani F' , G' e H' (figura 74).

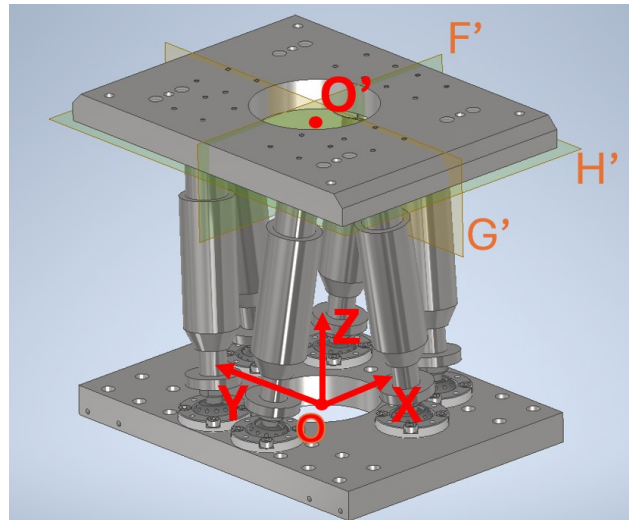


Figura 74: Piattaforma di Stewart, centro della base superiore O' e piani F' , G' , H'

- Si ottengono i quattro spigoli inferiori della base superiore A, B, C, D come intersezione dei piani AA' , BB' , CC' , DD' e H' (figura 75).

Ad esempio il punto D si trova come intersezione dei piani AA' , DD' e H' .

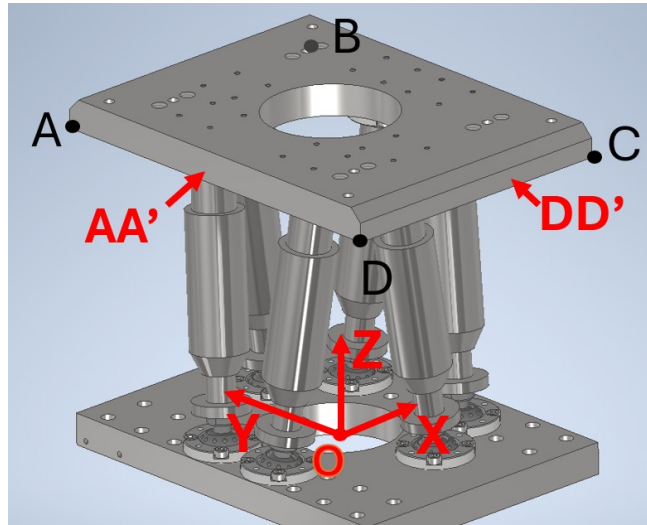


Figura 75: Spigoli inferiori della base superiore, punto D

Il punto A come intersezione dei piani BB' , AA' e H' (figura 76).

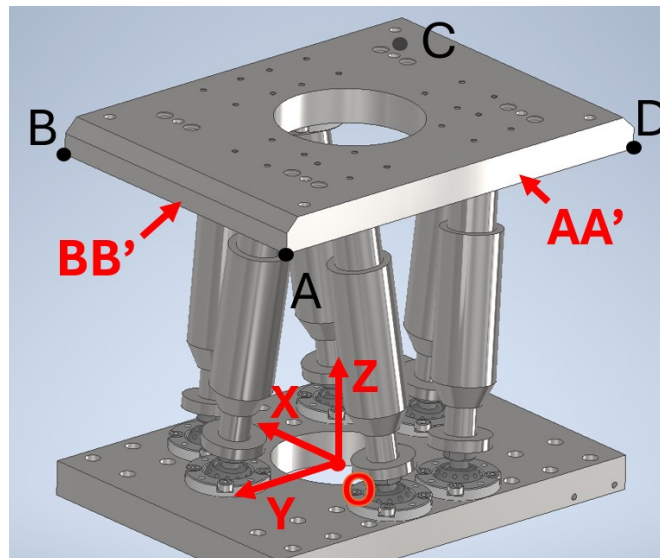


Figura 76: Spigoli inferiori della base superiore, punto A

Calcolo della matrice di rotazione a partire dagli spigoli

I punti A, B, D servono ad ottenere la matrice di rotazione della base superiore, così da definire la sua orientazione. Dato che si ha anche il punto O' si conosce completamente la posizione nello spazio della piattaforma di Stewart.

I passaggi matematici con i quali si ottiene la matrice di rotazione a partire dagli spigoli sono i seguenti:

- Si trova il vettore $\overline{BA} = B - A$.
- Si trova il vettore $\overline{AD} = A - D$.
- Si calcola il vettore $\overline{A_{norm}}$ come prodotto vettoriale (figura 77):

$$\overline{A_{norm}} = \overline{BA} \times \overline{AD}$$

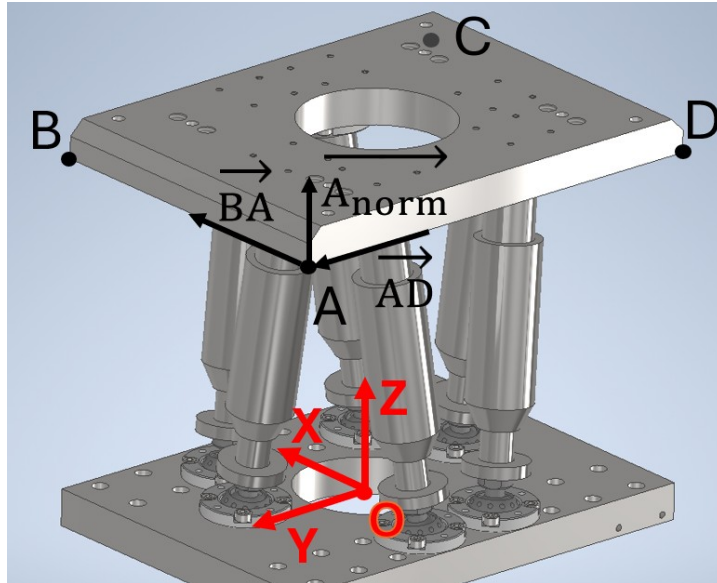


Figura 77: Vettori degli spigoli della base superiore

- Si divide $\overline{A_{norm}}$ per il suo modulo, così da ottenere il versore $\hat{n}$

$$\hat{n} = \frac{\overline{A_{norm}}}{|\overline{A_{norm}}|}$$

- Si divide il vettore $\overline{BA}$ per il suo modulo, così da ottenere il versore $\hat{e}_1$

$$\hat{e}_1 = \frac{\overline{BA}}{|\overline{BA}|}$$

- Si ottiene il versore $\hat{e}_2$ come prodotto vettoriale di $\hat{n}$ ed $\hat{e}_1$:

$$\hat{e}_2 = \hat{n} \times \hat{e}_1$$

- I tre versori ottenuti possono formare una matrice di rotazione nella quale essi costituiscono le colonne (figura 78):

$$R = \begin{bmatrix} \hat{e}_1 & \hat{e}_2 & \hat{n} \end{bmatrix}$$

Si può notare che i tre versori hanno versi concordi con quelli del sistema XYZ.

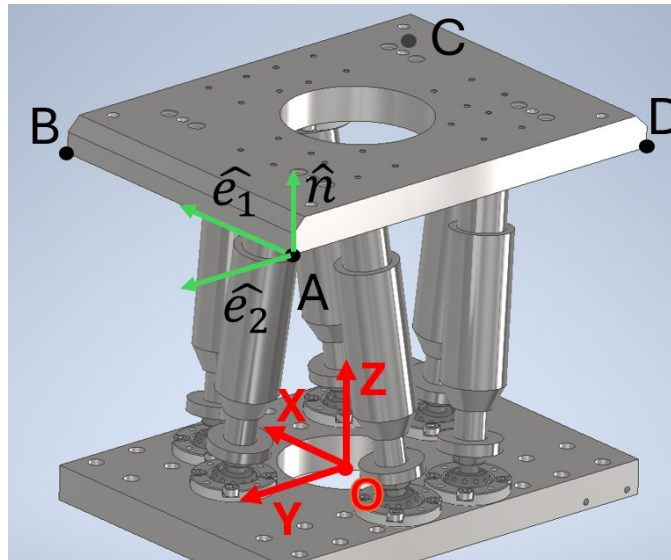


Figura 78: Versori per la matrice di rotazione della base superiore

La matrice R è la matrice di rotazione della base superiore, dato che i versori indicano la direzione dei tre "lati", ed è quella che viene utilizzata nella procedura della cinematica inversa.

6.2.3 Misurazioni effettuate

Le misurazioni sulla piattaforma di Stewart dell'ottante sinistro sono state realizzate a partire dal 10 febbraio 2026 fino al 24 febbraio 2026, per un totale di 61 misurazioni.

Esse sono numerate da 1 a 61 in ordine cronologico di esecuzione.

Le tabelle si trovano in Appendice e da esse si può notare che sono state utilizzate svariate configurazioni di lunghezza delle gambe.

Prima di parlare delle prove effettuate e dei risultati, c'è da spiegare più chiaramente le misure delle gambe della piattaforma.

Infatti il valore di lunghezza delle gambe utilizzato nella cinematica e nei modelli matematici delle prove è la distanza tra i centri dei due giunti sferici, cioè tra i due punti in cui c'è un movimento relativo tra gamba e basi della piattaforma.

Per questo c'è differenza tra lunghezza delle viti micrometriche che viene indicata nel paragrafo 3.2.5 e che è pari a 141 mm, e la lunghezza delle gambe misurata che è di circa 181 mm (come vedremo nei paragrafi successivi). I 40 mm di differenza sono dovuti ai giunti.

6.3 Cinematica della piattaforma di Stewart

Per verificare il corretto funzionamento della cinematica della piattaforma di Stewart innanzitutto va misurata la piattaforma con tutte le gambe impostate ad una variazione di lunghezza pari a 0, che chiamiamo configurazione 0, utilizzando la procedura del paragrafo 6.2.2.

I punti ottenuti si inseriscono nel file Matlab della cinematica inversa così da ricavarsi la lunghezza delle gambe nella configurazione 0.

La configurazione 0 è stata misurata almeno una volta al giorno nelle prove effettuate, poichè essa è utilizzata come configurazione di riferimento.

Successivamente, per ogni configurazione che si vuole verificare si segue la procedura:

- Si sceglie una certa configurazione delle gambe e la si imposta.
- Si misura la piattaforma secondo la procedura del paragrafo 6.2.2
- Si inseriscono i punti ottenuti nel codice Matlab ricavandoci la lunghezza delle gambe.
- Alla lunghezza delle gambe ottenuta si sottrae la lunghezza delle gambe della configurazione 0 più vicina cronologicamente
- La variazione di lunghezze così ricavata si confronta con quella impostata sulle viti e si individua l'errore, cioè la differenza tra valore di variazione di lunghezze ottenuto tramite misure e valore impostato manualmente sulle viti.

6.3.1 Esempio di verifica della cinematica

Come esempio vediamo la misurazione numero 21.

- La configurazione è la seguente:

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
21	6,75	0	0	7,9	0	0

- Si misura la piattaforma con la CMM ottenendo i seguenti punti (i valori misurati sono riferiti alla terna XYZ della base inferiore della piattaforma):

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A	-65,944	75,378	175,939
B	98,932	79,948	176,771
C	105,258	-144,877	179,782
D	-59,61	-149,527	178,951
O'	19,659	-34,770	177,861

- Questi punti sono gli input del file Matlab che calcola la matrice di rotazione e poi la cinematica inversa, restituendo come output la lunghezza delle gambe:

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
21	187,223	180,541	180,583	189,030	181,343	180,791

- A queste lunghezze si sottraggono le lunghezze della configurazione 0 più vicina cronologicamente, in questo caso la misurazione numero 24, effettuata immediatamente prima della numero 25:

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
21	187,223	180,541	180,583	189,030	181,343	180,791
20	180,382	180,496	180,581	181,103	181,360	180,796
ΔL	6,841	0,045	0,002	7,927	-0,017	-0,005

- Si ricava l'errore tra differenza di lunghezze calcolata e quella prevista dalla configurazione (cioè quella applicata manualmente alle viti).

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
ΔL	6,841	0,045	0,002	7,927	-0,017	-0,005
21	6,75	0	0	7,9	0	0
err	0,091	0,045	0,002	0,027	-0,017	-0,005

In questo caso l'errore massimo che si è ottenuto è di 91 μm sulla gamba 1.

6.3.2 Risultati

Tra tutte le misurazioni effettuate sulla cinematica si sono ottenuti valori di errore simili a quelli visti nell'esempio per la misurazione 21.

In generale l'errore massimo ottenuto per ogni singola gamba è il seguente:

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
err_max	0,104	0,118	0,072	0,080	0,083	0,076

C'è da sottolineare che questi errori delle sei gambe non sono stati ottenuti nella stessa misurazione, ma per ogni gamba si è preso l'errore massimo ottenuto in tutte e 61 le misurazioni.

Questi errori sono abbastanza bassi da poter confermare il corretto funzionamento della cinematica della piattaforma di Stewart.

In più va evidenziato che sono valori simili all'intervallo di valori in cui variano le lunghezze delle gambe per la stessa configurazione (vedi prossimo paragrafo sulla riproducibilità), quindi si può dire che questi errori non sono dovuti alla cinematica stessa, ma all'aspetto costruttivo e strutturale della piattaforma.

6.4 Riproducibilità della piattaforma di Stewart

Alcune delle 61 misurazioni effettuate per verificare la cinematica si possono utilizzare anche per definire la riproducibilità della piattaforma di Stewart.

La riproducibilità è definita come il grado di concordanza tra una serie di misure di uno stesso misurando (la grandezza oggetto di misurazione), quando le singole misurazioni sono effettuate cambiando una o più condizioni.

Ad esempio:

- modificando il metodo di misurazione;
- sostituendo l'operatore alla misura;
- sostituendo lo strumento di misura;
- spostandosi in altro luogo;
- modificando la condizione di utilizzo dello strumento o del misurando;
- effettuando misure in tempi più o meno lunghi.

Di queste solo l'ultima condizione è legata a queste misurazioni, dato che sono avvenute in un arco temporale relativamente lungo.

Il misurando è la piattaforma di Stewart in una determinata configurazione.

Dalla tabella con tutte le misurazioni (in Appendice) si può vedere la configurazione 0 è stata misurata varie volte nell'arco di più giorni. Su di essa si può determinare la riproducibilità.

Configurazione 0 É la configurazione su cui sono state effettuate più misure, almeno una al giorno, quindi è anche la più indicata per la riproducibilità.

leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
0	0	0	0	0	0

Figura 79: Configurazione 0

Nella seguente tabella sono indicate le misurazioni della posizione della base superiore della piattaforma ottenute con CMM della configurazione 0.

Sono tutte misure della configurazione 0. I numeri in arancione sulla sinistra indicano la posizione cronologica nelle 61 misurazioni effettuate in 15 giorni consecutivi.

misurazione	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	gamma [°]	delta [°]	teta [°]
1	-0,715	-0,227	179,723	-0,319	-0,021	-0,036
9	-0,713	-0,210	179,779	-0,313	-0,030	0,023
12	-0,747	-0,167	179,808	-0,299	-0,027	0,106
14	-0,691	-0,223	179,792	-0,302	-0,022	0,100
17	-0,800	-0,184	179,800	-0,309	-0,032	0,071
21	-0,720	-0,189	179,793	-0,321	-0,027	0,096
24	-0,860	-0,163	179,780	-0,326	-0,031	0,073
26	-0,842	-0,214	179,781	-0,305	-0,034	0,026
28	-0,855	-0,285	179,774	-0,301	-0,041	0,051
31	-0,801	-0,272	179,782	-0,302	-0,033	0,031
32	-0,824	-0,260	179,780	-0,304	-0,039	0,032
33	-0,826	-0,261	179,780	-0,304	-0,040	0,032
34	-0,851	-0,221	179,782	-0,310	-0,042	0,024
37	-0,728	-0,284	179,789	-0,315	-0,051	-0,016
40	-0,649	-0,273	179,791	-0,317	-0,041	0,003
43	-0,838	-0,117	179,776	-0,336	-0,048	0,058
51	-0,797	-0,286	179,777	-0,326	-0,038	0,033
52	-0,806	-0,239	179,770	-0,332	-0,038	0,005
54	-0,738	-0,252	179,767	-0,324	-0,041	0,039
56	-0,806	-0,266	179,774	-0,322	-0,045	0,012
58	-0,784	-0,263	179,775	-0,322	-0,045	0,021
60	-0,813	-0,255	179,779	-0,320	-0,060	0,029
62	-0,685	-0,174	179,771	-0,308	-0,027	0,000
64	-0,813	-0,127	179,760	-0,303	-0,030	0,085

Figura 80: Configurazione 0: posizione del centro della base superiore e angoli di eulero

Dalle posizioni ottenute si può ricavare la lunghezza delle gambe utilizzando il codice Matlab di cinematica inversa.

Sono indicate nella tabella seguente.

misurazione	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	180,347	180,417	180,556	181,053	181,294	180,712
9	180,403	180,484	180,602	181,103	181,333	180,784
12	180,416	180,543	180,634	181,129	181,341	180,818
14	180,404	180,519	180,620	181,129	181,323	180,794
17	180,415	180,526	180,614	181,117	181,354	180,810
21	180,399	180,501	180,605	181,132	181,347	180,809
24	180,382	180,496	180,581	181,103	181,360	180,796
26	180,407	180,510	180,596	181,088	181,342	180,781
28	180,412	180,513	180,576	181,083	181,327	180,774
31	180,416	180,512	180,598	181,098	181,334	180,776
32	180,416	180,509	180,588	181,089	181,336	180,781
33	180,418	180,510	180,588	181,089	181,336	180,783
34	180,415	180,506	180,587	181,086	181,349	180,792
37	180,447	180,486	180,590	181,098	181,347	180,802
40	180,438	180,480	180,603	181,116	181,340	180,802
43	180,389	180,473	180,565	181,088	181,363	180,816
51	180,409	180,480	180,569	181,106	181,352	180,785
52	180,398	180,464	180,567	181,095	181,358	180,781
54	180,400	180,465	180,566	181,095	181,332	180,784
56	180,414	180,479	180,569	181,089	181,348	180,786
58	180,414	180,477	180,570	181,094	181,345	180,789
60	180,431	180,486	180,561	181,082	181,346	180,808
62	180,395	180,475	180,609	181,090	181,321	180,774
64	180,366	180,497	180,585	181,070	181,309	180,774

Figura 81: Configurazione 0: lunghezza delle gambe misurata, valori in mm

Per capire con quanta precisione la piattaforma di Stewart raggiunge la stessa posizione teorica (quella della configurazione 0) ci si ricava la differenza tra valore massimo e valore minimo, per capire l'ampiezza dell'intervallo in cui si trovano i valori ottenuti. Per semplicità chiamiamo quest'intervallo "variazione".

$$variazione = Valore_{max} - Valore_{min}$$

Ottenendo i seguenti risultati:

X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	gamma [°]	delta [°]	teta [°]
0,212	0,169	0,048	0,037	0,038	0,122

Figura 82: Configurazione 0: variazione posizione e orientamento della base superiore

Quindi la posizione del centro O' della base superiore nella configurazione 0 varia in un intervallo di 0,212 mm nella coordinata X.

Si può dire che la piattaforma di Stewart non raggiunge esattamente la stessa posizione quando torna alla configurazione 0 dopo aver utilizzato altre configurazioni. Ciò può essere legato all'aspetto costruttivo e strutturale della piattaforma.

Si può calcolare inoltre il valore medio della posizione e orientamento della base superiore utilizzando i valori misurati:

X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	gamma [°]	delta [°]	teta [°]
-0,791	-0,232	179,778	-0,316	-0,039	0,033

Figura 83: Configurazione 0: valore medio della posizione del centro della base superiore e del suo orientamento

Come si può notare dal valore medio, nella configurazione con tutte le gambe a 0 la posizione del centro della base superiore non si trova perfettamente allineata col centro della base inferiore, infatti i valori di x e y sono diversi da 0. Ciò non rappresenta in alcun modo un problema per il funzionamento della piattaforma.

Si calcola la variazione anche per i valori di lunghezza delle gambe:

leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
0,081	0,080	0,073	0,061	0,055	0,044

Figura 84: Configurazione 0: variazione della lunghezza delle gambe, valori in mm

Quindi, per esempio, i valori di lunghezza della gamba 1 nella configurazione 0 variano in un intervallo di 0,081 mm.

Inoltre si può calcolare la media di lunghezza delle gambe nella configurazione 0, ottenendo:

leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
180,409	180,490	180,583	181,094	181,342	180,789

Figura 85: Configurazione 0: valore medio di lunghezza delle gambe, in mm

6.5 Misurazioni sul sistema dell'ottante sinistro

Una volta verificata l'accuratezza della cinematica della sola piattaforma di Stewart, si è provveduto a caratterizzare il sistema integrale dell'ottante sinistro, completamente assemblato presso il Laboratorio Tecnologico di Torino.

Sono state quindi effettuate misurazioni sull'intero sistema del guscio dell'ottante sinistro al fine di valutarne la ripetibilità e verificare il funzionamento della cinematica.

Per queste prove viene misurato il guscio tramite la CMM.

6.5.1 Approfondimento su come misurare il guscio tramite CMM

Ciò che serve per le caratterizzazioni del sistema dell'ottante è la posizione del centro dei fori del guscio.

Il centro di un foro si ottiene come intersezione tra asse del foro (N in figura 86) e piano di riferimento del foro (M in figura 86).

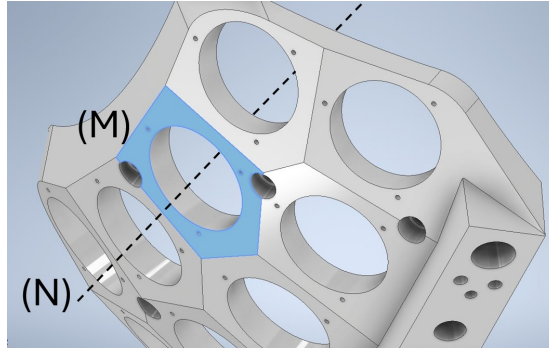


Figura 86: Modello 3D: guscio ottante sinistro. Piano di riferimento del foro (M), asse del foro (N)

Con la CMM si misura il piano del foro (M) toccando con il tastatore sei punti di quel piano.

Per ottenere l'asse (N) si toccano con il tastatore sei punti della superficie cilindrica interna del foro. Di questi sei punti, tre vengono presi ad una certa posizione assiale molto vicina al bordo (circa 2-3 mm) e gli altri tre ad un'altra posizione assiale distante dalla prima circa 7 mm, quindi circa 9-10 mm dal bordo. Per contesto, la lunghezza assiale del foro è di poco più di 15 mm.

La CMM calcola l'intersezione tra piano e asse del foro restituendo le coordinate del punto, che noi definiamo come centro del foro.

6.5.2 Definizione sistema di riferimento

Il sistema di riferimento per la definizione delle coordinate dei punti ottenuti con CMM è impostato con l'origine nel centro della base inferiore della piattaforma di Stewart.

Per definirlo bisogna prima misurare la base inferiore della piattaforma di Stewart.

Per prima cosa si misurano i piani laterali CC, DD e il piano superiore H della base inferiore.

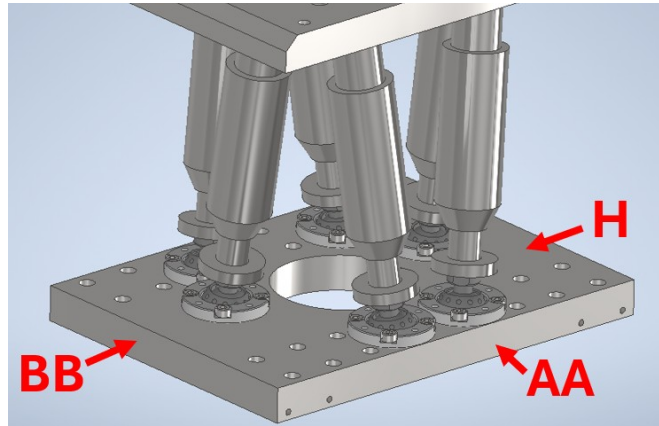


Figura 87: Piani misurati

Ci si ricava il piano F con un offset pari a metà del lato della piattaforma di Stewart (82,5 mm) e il piano G con offset pari a metà dell'altro lato (112,5 mm).

Si trova l'origine O come intersezione di F, G, H e gli assi X, Y, Z perpendicolari rispettivamente a F, G, H (figura 88).

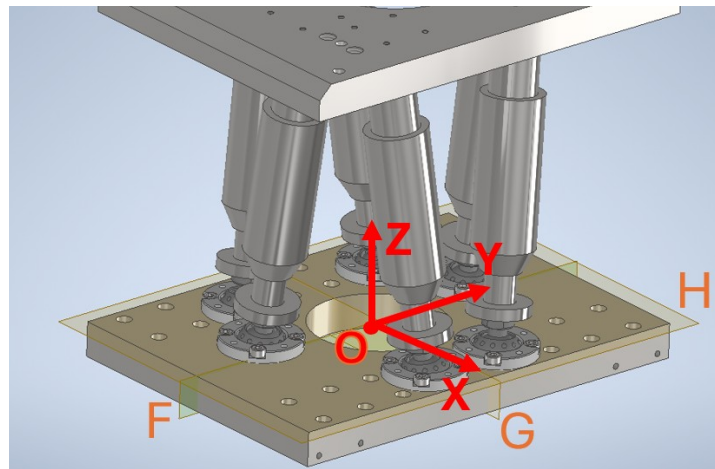


Figura 88: Sistema di riferimento con centro O nella base inferiore della piattaforma di Stewart

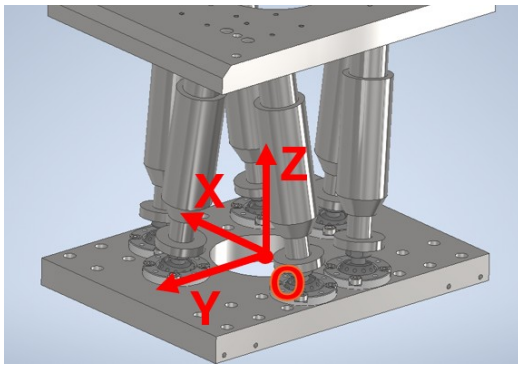
Differenza con sistema di riferimento della sola piattaforma

Per evitare ambiguità nella lettura dei risultati bisogna sottolineare una differenza tra il sistema di riferimento definito per le misurazioni sulla sola piattaforma di Stewart e quello definito per le misurazioni sul sistema completo.

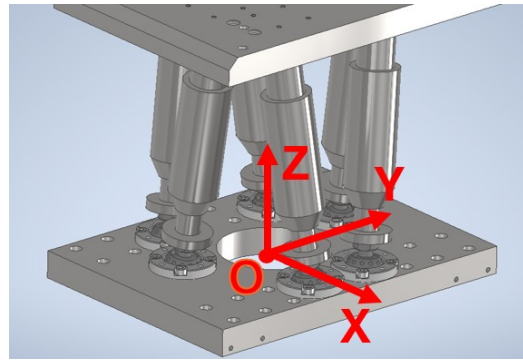
Infatti gli assi X e Y sono nel verso opposto tra le due campagne di misurazione. L'asse Z è invece nello stesso verso ed anche l'origine coincide.

Ciò è dovuto al fatto che, per problemi di ingombro sul piano di misura della CMM, il sistema completo dell'ottante sinistro è stato posizionato al contrario.

Nella figura 89 c'è la comparazione tra i due sistemi di riferimento.



(a) Sistema di riferimento per misurazioni della sola piattaforma di Stewart



(b) Sistema di riferimento per misurazioni del sistema completo

Figura 89: Sistemi di riferimento per misurazioni

È importante chiarire questa differenza perchè serve a spiegare, ad esempio, la differenza delle coordinate del centro della base superiore della piattaforma tra le due campagne di misurazione, come si vede dalle tabelle:

X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
-0,800	-0,184	179,800

Figura 90: Coordinate O' in misurazioni con la sola piattaforma di Stewart

X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
0,811	0,563	179.893

Figura 91: Coordinate O' in misurazioni del sistema completo

Si nota infatti che le coordinate X e Y della misurazione della sola piattaforma di Stewart sono opposte a quelle della misurazione del sistema completo.

6.6 Ripetibilità del sistema dell'ottante sinistro

La prima caratterizzazione effettuata sul sistema del guscio dell'ottante sinistro è la ripetibilità del movimento di fuoriuscita e rientro del cilindro pneumatico. Quindi la piattaforma di Stewart è stata impostata sulla configurazione 0 e non è stata mai modificata in queste misurazioni.

La procedura seguita è questa:

- Si porta il cilindro nella posizione di finecorsa in cui è dentro alla camera usando le valvole comandate con PLC (come spiegato nel capitolo 5).
- Si fa fuoriuscire il cilindro fino al finecorsa, che sarebbe la sua posizione di lavoro.
- Si misurano i tre centri dei fori indicati in figura 92 con la CMM, come spiegato nel paragrafo 6.5.1.

Questa procedura si ripete varie volte consecutivamente e si confrontano le posizioni dei centri ottenute così da valutare la ripetibilità.

Sono state effettuate in due giorni, in particolare si sono eseguite 10 misure il 12 marzo e 14 misure il 16 marzo.

In Appendice ci sono le tabelle con i valori ottenuti da ogni misurazione. Le coordinate dei punti 1, 2, 3 sono riferite al sistema di riferimento XYZ con origine in O (centro della base della piattaforma).

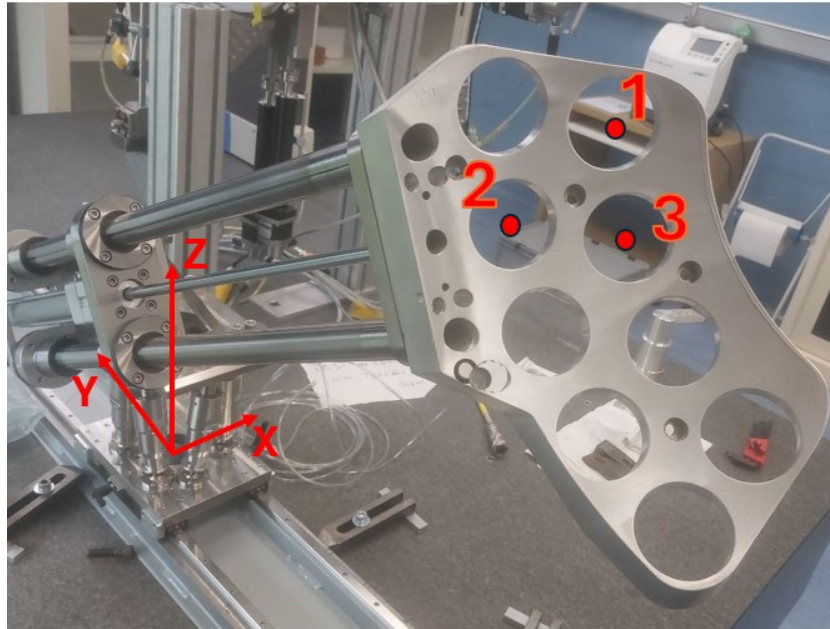


Figura 92: Centri dei fori da ottenere con la CMM

Qui di seguito è indicato l'intervallo di variazione dei valori delle coordinate dei tre punti, come è stato fatto per la riproducibilità della piattaforma di Stewart (paragrafo 6.4).

La variazione è quindi calcolata così:

$$variazione = Valore_{max} - Valore_{min}$$

In figura 93 ci sono le variazioni calcolate per ogni coordinata dei tre punti.

punto 1			punto 2			punto 3		
X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
0,654	0,271	0,323	0,616	0,281	0,3	0,669	0,289	0,326

Figura 93: Variazione delle coordinate dei punti 1, 2 e 3 nelle prove di ripetibilità

Questa prova di ripetibilità riguarda principalmente il sistema di movimentazione, in quanto non si è intervenuti sulla piattaforma di Stewart, lasciando sempre la stessa configurazione.

La posizione dei punti in questo caso ha una variazione maggiore rispetto alla riproducibilità della piattaforma.

6.7 Caratterizzazione del guscio dell'ottante sinistro

Le misure effettuate sul sistema dell'ottante sinistro ai fini della ripetibilità del 12 e 16 marzo sono state utilizzate anche per la caratterizzazione del guscio.

Infatti si è verificato se i fori dei rivelatori sono nella posizione giusta rispetto al bersaglio, e con quale precisione.

Essi devono essere realizzati in modo che il loro asse (e di conseguenza l'asse dei rivelatori gamma) passi per il punto centrale del bersaglio entro un certo errore.

Quindi gli assi di ognuno dei fori devono passare tutti per lo stesso punto. Ciò significa che il punto di intersezione tra l'asse del foro 1 e l'asse del foro 2 deve coincidere con il punto di intersezione del foro 2 con il foro 3, ed entrambi devono coincidere con l'intersezione tra foro 1 e foro 3 (il foro 1 è il foro con centro il punto 1, e così gli altri due).

Allora nelle stesse misurazioni effettuate per la ripetibilità, dato che erano stati ricavati gli assi dei fori, si è calcolato tramite la CMM stessa le coordinate dei seguenti punti:

- Intersezione tra asse del foro 1 e asse del foro 2
- Intersezione tra asse del foro 2 e asse del foro 3
- Intersezione tra asse del foro 1 e asse del foro 3

Di seguito è presentato il risultato della prima misurazione effettuata il 12 marzo.

		intersezione assi 1 e 2			intersezione assi 1 e 3			intersezione assi 2 e 3		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
12-mar	1	-358,284	-663,385	706,499	-357,798	-663,16	706,33	-359,05	-664,177	707,064

Figura 94: Misurazione 1: coordinate delle intersezioni tra gli assi dei fori 1, 2, 3, in mm

La massima differenza tra le coordinate dei tre punti di intersezione è la seguente:

		x	y	z
12-mar	1	1,252	1,017	0,734

Figura 95: Misurazione 1: massima differenza tra i punti di intersezione degli assi dei fori, in mm

Si può vedere che differiscono di circa 1 mm, la differenza maggiore c'è sulla coordinata X, in cui si passa da -357,798 mm a -359,05 mm, quindi 1,252 mm di differenza.

Gli stessi calcoli si possono eseguire anche per le altre misurazioni effettuate il 12 e 16 marzo, che si trovano nelle tabelle in Appendice.

Qui di seguito è riportata la media delle coordinate dei punti di intersezione ottenuti in tutte le misurazioni e la differenza tra valore minimo e massimo per ogni coordinata.

	intersezione assi 1 e 2			intersezione assi 1 e 3			intersezione assi 2 e 3		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
media	-359,275	-663,937	707,0487	-359,769	-664,305	707,1369	-359,108	-663,697	706,826
differenza	2,222	1,222	0,894	3,131	1,804	1,224	1,569	0,836	0,544

Figura 96: Media delle coordinate dei punti di intersezione e differenza tra valore massimo e minimo per la singola coordinata

La differenza tra valore minimo e massimo in questo caso è significativa. Ad esempio per la coordinata X dell'intersezione tra assi 1 e 2 è pari a 2,222 mm. Sono valori più alti di quelli indicati in figura 95, quindi questo può stare a significare che la differenza tra i tre punti di intersezione potrebbe essere dovuta al fatto che i punti stessi non sono misurati in modo abbastanza preciso.

Questo potrebbe essere dovuto al fatto che con la CMM gli assi dei cilindri non possono essere valutati con l'elevata precisione necessaria, in quanto essi si ricavano misurando i punti interni dei fori del guscio, ed un piccolo errore di misura

della CMM di questi punti del foro comporta un errore molto più significativo nella ricostruzione dell'asse (che usa questi punti).

6.8 Cinematica del sistema dell'ottante sinistro

Le ultime misurazioni eseguite hanno riguardato la verifica del funzionamento della cinematica del sistema completo dell'ottante sinistro, descritta nel paragrafo 4.5.

Sono state effettuate il 24 marzo e il 15 aprile, per un totale di 14 misurazioni, usando diverse configurazioni.

In ognuna di esse sono stati misurate le coordinate dei punti 1, 2, 3 (figura 97), in due sistemi di riferimento:

- Nel sistema di riferimento della base inferiore (vedi paragrafo 6.5.2)

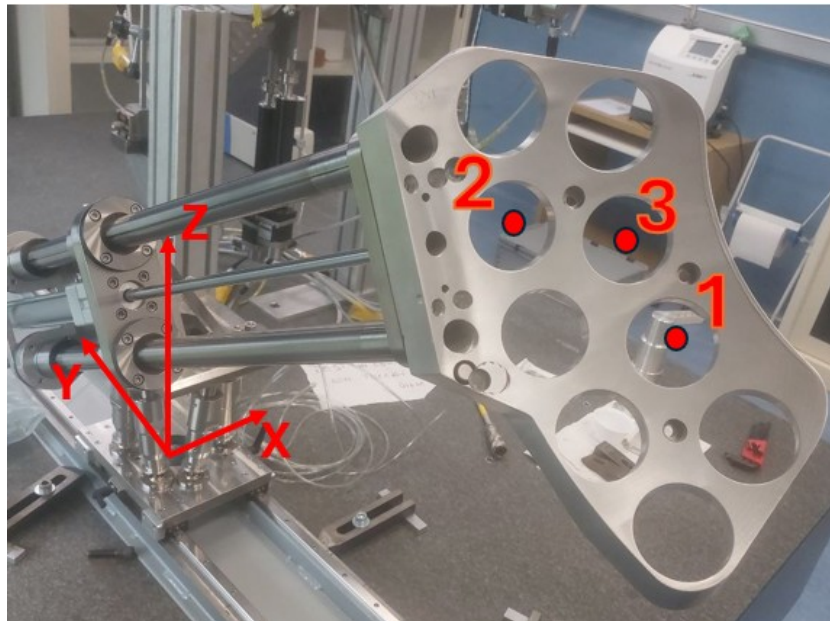


Figura 97: Punti 1, 2 e 3 misurati per la cinematica del sistema dell'ottante sinistro

- Nel sistema di riferimento della base superiore $X'Y'Z'$, il quale ha origine nel centro della superficie inferiore della base superiore (figura 98).

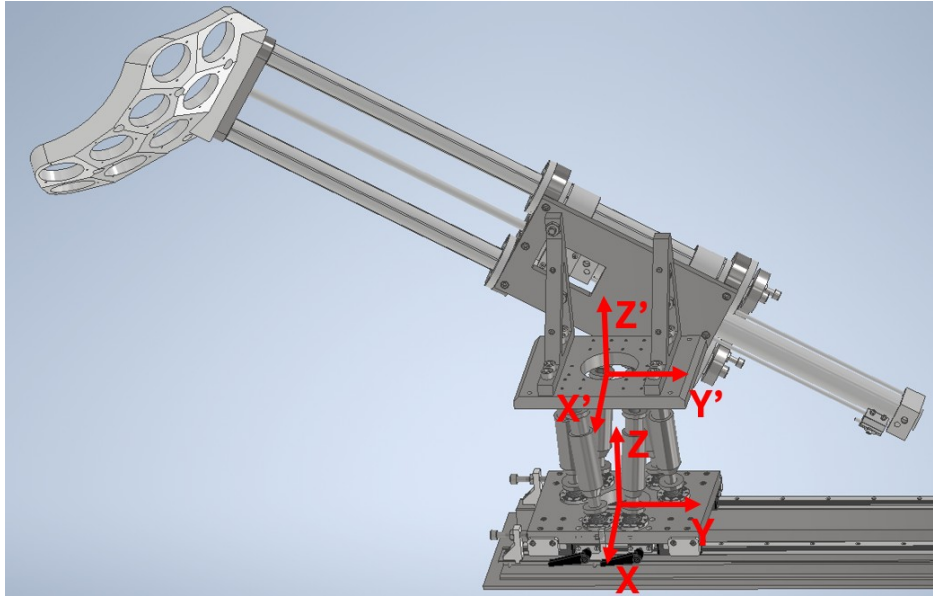


Figura 98: Sistemi di riferimento per la cinematica del sistema completo dell'ottante sinistro

Il sistema di riferimento $X'Y'Z'$ si ricava così:

- Si misurano i piani laterali AA' , BB' e il piano inferiore H' della base superiore (figura 99).
- Ci si ricava il piano F' con un offset pari a metà del lato della piattaforma di Stewart (82,5 mm) e il piano G' con offset pari a metà dell'altro lato (112,5 mm).

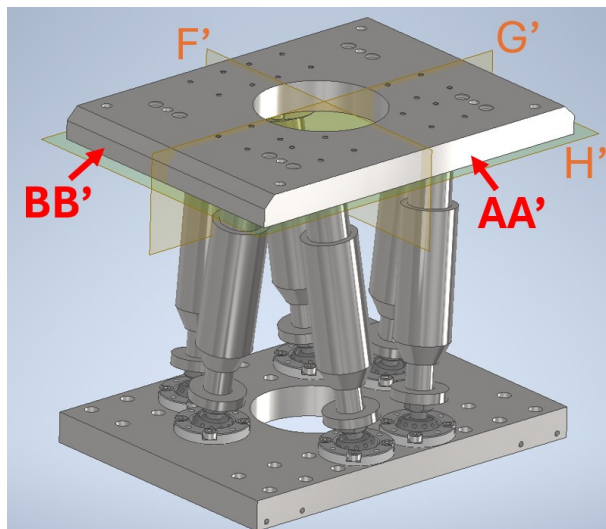


Figura 99: Piani della base superiore. Si è nascosto il blocco dell'attuatore nella figura per rendere più visibili i piani.

- Si ottiene O' come intersezione di F' , G' , H' e gli assi X' , Y' , Z' perpendicolari rispettivamente a F' , G' , H' (figura 100).

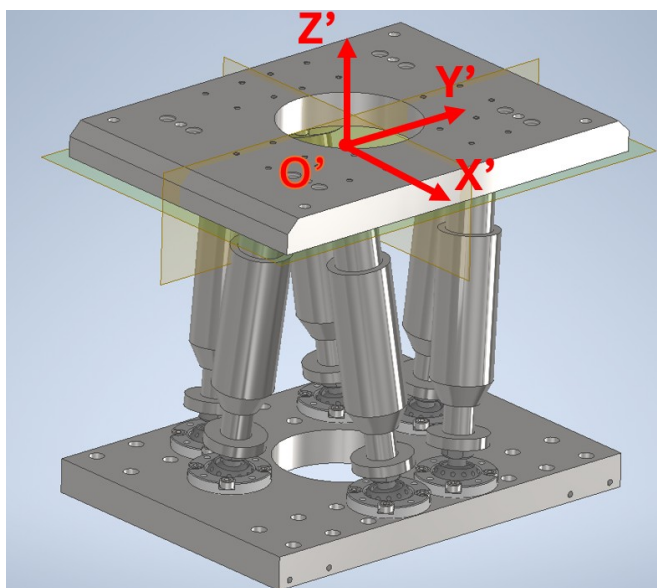


Figura 100: Sistema di riferimento della base superiore

Come spiegato nel paragrafo 4.5.2 le coordinate dei punti 1, 2, 3 nel sistema di riferimento X'Y'Z' sono parametri della procedura cinematica, quindi sempre le stesse indipendentemente dalle configurazioni. Le si è misurate comunque in ogni misurazione così da avere una maggiore quantità di dati e ricavarne i loro valori medi. Questi valori medi vengono utilizzati nel codice Matlab come parametri.

Nella procedura di verifica della cinematica si sono seguiti i seguenti passaggi (di seguito sono riportati come esempio le misurazioni 7 e 8):

- Impostare la configurazione 0 alle gambe.

	leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
7	0	0	0	0	0	0

- Misurare i punti 1, 2, 3 come descritto precedentemente.

	Punto 1			Punto 2			Punto 3		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
7	-13,233	-629,097	507,369	-70,753	-517,264	559,663	-13,302	-574,529	562,54

- Inserire le coordinate dei punti nel sistema XYZ nel codice Matlab, ricavandosi la lunghezza delle gambe della piattaforma.

	leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
7	180,491	180,832	180,913	181,186	181,244	180,665

- Impostare una nuova configurazione alle gambe

	leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
8	-1,5	0	3	0	0	0

- Misurare nuovamente i punti 1, 2, 3.

	Punto 1			Punto 2			Punto 3		
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
8	-44,446	-636,330	510,766	-99,235	-522,317	561,251	-43,778	-581,421	565,594

- Inserirli nel codice ricavandosi la lunghezza delle gambe.

	leg1	leg2	leg3	leg4	leg5	leg6
8	178,928	180,818	183,978	181,211	181,208	180,636

- Calcolare la differenza tra lunghezze della nuova configurazione e lunghezze della configurazione 0.

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
7	180,491	180,832	180,913	181,186	181,244	180,665
8	178,928	180,818	183,978	181,211	181,208	180,636
ΔL	-1,563	-0,015	3,065	0,025	-0,036	-0,029

- Confrontare la differenza di lunghezze così calcolata con la configurazione impostata manualmente sulle viti, trovandosi l'errore

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
ΔL	-1,563	-0,015	3,065	0,025	-0,036	-0,029
8	-1,5	0	3	0	0	0
err	-0,063	-0,015	0,065	0,025	-0,036	-0,029

L'errore massimo per la configurazione 8 è di 65 μm , abbastanza basso da poter dire che la cinematica del sistema completo dell'ottante sinistro funziona correttamente.

In Appendice sono presenti i risultati delle 14 misurazioni. Nella misurazione 10 si sono ottenuti errori molto più alti rispetto alle altre, arrivando anche a 500 μm ; questo valore così diverso può essere spiegato come derivante da una non corretta procedura di utilizzo della CMM per quella misurazione.

Per quanto riguarda le altre misurazioni, l'errore massimo ottenuto in queste è di 142 μm , e in generale si attesta quasi sempre sotto i 100 μm ; sono dei valori sufficientemente bassi da poter confermare il corretto funzionamento della cinematica del sistema completo.

7 Conclusioni

Il lavoro di questa tesi ha riguardato l'analisi e la messa in opera dei sistemi di movimentazione e posizionamento per i rivelatori gamma dell'esperimento NUMEN. Essi vengono posizionati su dei gusci in alluminio.

Nell'esperimento c'è bisogno di movimentare e posizionare i rivelatori, e quindi i gusci, attorno alla camera di scattering con elevata precisione. Inoltre, dato che gli operatori non possono accedere alla sala sperimentale durante l'esperimento, la movimentazione deve avvenire in maniera semi-automatica con attuatori pneumatici controllati tramite PLC dall'esterno della sala sperimentale.

Il sistema di posizionamento è basato sulla piattaforma di Stewart, un manipolatore parallelo a sei gradi di libertà in grado di garantire l'elevata rigidità e precisione richiesta dall'esperimento. La regolazione avviene tramite sei viti micrometriche con risoluzione di 0,05 mm, collegate alle basi mediante giunti sferici ad alta precisione.

Per regolare la posizione dei gusci si utilizzano le viti (gambe) della piattaforma di Stewart. Infatti cambiando la lunghezza delle gambe della piattaforma cambia il posizionamento della sua base superiore, e quindi anche dell'attuatore e del guscio, solidali ad essa.

Per questo è stato sviluppato un modello analitico di cinematica inversa che consente di tradurre la posizione e l'orientamento desiderati per il guscio dei rivelatori nelle lunghezze di estensione delle sei gambe della piattaforma.

Questo modello è stato poi tradotto in un codice di calcolo Matlab che è stato utilizzato nelle prove effettuate al Laboratorio Tecnologico dell'INFN di Torino.

Per quanto riguarda la movimentazione degli attuatori, essa è stata automatizzata tramite un sistema di controllo basato su PLC Crouzet.

Gli attuatori muovono i gusci, a cui sono solidali. Essi sono cilindri pneumatici lineari gestiti da elettrovalvole, e usano freni pneumatici che si attivano in assenza di pressione per motivi di sicurezza.

Il sistema di controllo è stato provato nel Laboratorio Tecnologico di Torino ed è stato verificato il suo corretto funzionamento.

Inoltre sono state effettuate delle prove per verificare il corretto funzionamento della piattaforma di Stewart, sia per quanto riguarda la sua stabilità meccanica, sia per il funzionamento della sua cinematica, e in seguito sul sistema completo, sia per la sua ripetibilità che per la sua cinematica.

Per queste prove sono state eseguite numerose misurazioni con una macchina di misura a coordinate CMM, prima sulla sola piattaforma di Stewart e successivamente su tutto il sistema di movimentazione e posizionamento dell'ottante sinistro.

Con queste misurazioni è stata verificata la cinematica della sola piattaforma di Stewart ottenendo ottimi risultati che ne confermano il corretto funzionamento. È stata verificata anche la riproducibilità della piattaforma, per vedere con quale precisione essa tornasse nella stessa posizione nominale, ottenendo un'insieme di valori per le coordinate della stessa posizione che variano in un intervallo di circa 0,2 mm.

Le prime misurazioni effettuate sul sistema completo dell'ottante sinistro sono state fatte per verificare la sua ripetibilità, cioè con quale precisione il guscio torna nella stessa posizione quando l'attuatore viene azionato, facendo rientrare e fuoriuscire il cilindro. I risultati hanno dimostrato un intervallo di variazione di alcuni decimi di millimetro delle coordinate X, Y e Z dei punti del guscio per la stessa posizione nominale.

In seguito sono state eseguite misurazioni per la verifica della cinematica inversa del sistema completo, ottenendo buoni risultati che confermano il corretto funzionamento della cinematica anche quando è applicata al sistema completo.

Per il futuro si possono adattare gli stessi modelli e le stesse procedure usate nel lavoro di questa tesi per verificare il corretto funzionamento anche del sistema di movimentazione e posizionamento del guscio dell'ottante destro.

Riferimenti bibliografici

- [1] F. Cappuzzello, C. Agodi, D. Calvo, D. Carbone, M. Cavallaro, M. Colonna, M. Giovannini, R. Linares, J. R. B. Oliveira, L. Pandola, D. Pierroutsakou, A. D. Russo, E. Santopinto, V. Soukeras, A. Spatafora, D. Torresi, S. Tudisco, L. Acosta, N. Added, V. A. P. de Aguiar, P. Amador-Valenzuela, N. Anastasios, N. Auerbach, L. H. Avanzi, Y. Yyyad, R. Babu, J. I. Bellone, R. Bijker, A. Boianos, I. Boztosun, S. Brasolin, G. A. Brischetto, C. Cabo Landeira, S. Calabrese, L. Campajola, E. N. Cardozo, K. Challa, E. R. Chávez-Lomelí, E. F. Chinaglia, I. Ciraldo, A. Comite, M. Cortesi, K. M. Costa, H. Dapo, C. De Benedictis, G. De Gregorio, F. Delaunay, L. M. Donaldson, F. Dumitrache, C. Ferraresi, J. L. Ferreira, P. Finocchiaro, M. Fisichella, D. Gambacurta, E. M. Gandolfo, H. Garcia-Tecocoatzi, A. Gargano, C. Garofalo, R. Gleason, M. A. Guazzelli, A. Hacisalihoglu, A. Huerta Hernandez, V. Izzos, T. C. Khumalo, S. Koulouris, Y. Kucuk, L. La Fauci, J. A. Lay, H. Lenske, C. Lombardo, J. M. López González, J. Lubian, D. J. Marín-Lámbarri, 14 Mas-Ruiz, S. A. Masunaga, N. H. Medina, M. Morales, L. Neri, R. Neveling, M. Pagliero, A. Pakou, K. Palli, A. Pandalone, R. Panero, M. Paterna, L. Pellegri, R. Persiani, H. Petrascu, N. Pietralla, F. Pinna, A. Pitronaci, S. Sandoval, T. M. Santarelli, R. B. B. Santos, D. Sartirana, J. V. Schervenin, O. Sgouros, S. O. Solakci, G. Souliotis, R. Thang, B. Urazbekov, C. Valencia, I. Valinotto, A. Vanzanellas, R. I. M. Vsevolodovna, A. Yildirim, and V. A. B. Zagatto. The NUMEN project: NUClear matrix elements for neutrinoless double beta decay (2nd edition). *Nuclear Physics A*, 2026. Review article on the NUMEN project main achievements and upgrades.
- [2] David J. Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. Wiley, 1987. Fonte classica per il Modello Standard della fisica delle particelle.
- [3] Wendell H. Furry. On transition probabilities in double beta-disintegration. *Physical Review*, 56(12):1184–1193, 1939. Articolo cardine in cui Furry propone il meccanismo del doppio decadimento beta senza neutrini.

- [4] Ettore Majorana. Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone. *Il Nuovo Cimento*, 14:171–184, 1937. Articolo originale in cui Ettore Majorana teorizza i fermioni omonimi.
- [5] Stefano Belliardo. Handling system design as part of the NUMEN experiment at the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Master's thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy, April 2022.
- [6] Maria Goeppert-Mayer. Double beta-disintegration. *Physical Review*, 48(6):512–516, 1935. Articolo fondamentale sulla prima teorizzazione del decadimento doppio beta con neutrini.
- [7] F. Cappuzzello, C. Agodi, M. Cavallaro, D. Carbone, S. Tudisco, D. Lo Presti, J. R. B. Oliveira, P. Finocchiaro, M. Colonna, D. Rifuggiato, L. Calabretta, D. Calvo, L. Pandola, L. Acosta, N. Auerbach, J. Bellone, R. Bijker, D. Bonanno, D. Bongiovanni, T. Borello-Lewin, I. Boztosun, O. Brunasso, S. Burrello, S. Calabrese, A. Calanna, E. R. Chãvez Lomelí, G. D'Agostino, P. N. De Faria, G. De Geronimo, F. Delaunay, N. Deshmukh, J. L. Ferreira, M. Fisichella, A. Foti, G. Gallo, H. Garcia-Tecocoatzí, V. Greco, A. Hacisalihoglu, F. Iazzi, R. Introzzi, G. Lanzalone, J. A. Lay, F. La Via, H. Lenske, R. Linares, G. Litrico, F. Longhitano, J. Lubian, N. H. Medina, D. R. Mendes, M. Morales, A. Muoio, A. Pakou, H. Petrascu, F. Pinna, S. Reito, A. D. Russo, G. Russo, G. Santagati, E. Santopinto, R. B. B. Santos, O. Sgouros, M. A. G. da Silveira, S. O. Solakci, G. Souliotis, V. Soukeras, A. Spatafora, D. Torresi, R. Magana Vsevolodovna, A. Yildirim, and V. A. B. Zagatto. The NUMEN project: NUClear matrix elements for neutrinoless double beta decay. *The European Physical Journal A*, 54:72, 2018.
- [8] D. Calvo, D. Sartirana, S. Brasolin, R. Panero, C. Ferraresi, F. Cappuzzello, and M. Cavallaro. Equipped scattering chamber for the NUMEN experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1082:171043, 2026.

8 Appendice

8.1 Codici Matlab

8.1.1 Codice per cinematica inversa della sola piattaforma di Stewart

```
INPUT

1  % A, B, C, D are the 3D coordinates of the rectangle's corners
2
3  O_sup = [-0.801,-0.272,179.782]';
4
5  A = [-83.396,112.167,179.143]';
6  B = [81.547,112.258,179.236]';
7  C = [81.79,-112.671,180.421]';
8  D = [-83.144,-112.841,180.329]';

Calcolo matrice rotazione

9  BA = B - A;
10 AD = A - D;
11 Anormal = cross(BA, AD);
12 n = Anormal / norm(Anormal);
13 e1 = BA / norm(BA);
14 e2 = cross(n, e1);
15
16 % Construct the rotation matrix from the plane's basis vectors
17 rotation_matrix = [e1 e2 n];
18
19 % Calculate Euler angles (rotations in XYZ)
20 xyz_rot = rad2deg(rotm2eul(rotation_matrix,"XYZ"));

Parametri

21 % Lower base platform attachment points (in the lower base reference system)
22 P1=[49.834,41.765,-10.52+11]';
23 P2=[11.327,63.988,-10.504+11]';
24 P3=[-61.058, 22.228,-10.654+11]';
25 P4=[-61.06,-22.233,-10.803+11]';
26 P5=[11.3,-64.009,-10.898+11]';
27 P6=[49.825,-41.784,-10.779+11]';
28
29 P = [P1 P2 P3 P4 P5 P6];
30
31 % Upper base platform attachment points (in the upper base reference system)
32 Q1=[58.708,21.383,-11.171+11]';
33 Q2=[-10.875,61.556,-10.94+11]';
34 Q3=[-47.912,40.187,-10.888+11]';
35 Q4=[-47.907,-40.162,-11.017+11]';
36 Q5=[-10.873,-61.536,-11.135+11]';
```

```

37     Q6=[58.704,-21.364,-11.243+11i]';
38
39     Q = [Q1 Q2 Q3 Q4 Q5 Q6];

Cinematica inversa

40     OQ = O_sup + rotation_matrix * Q;
41
42     lengths = [0 0 0 0 0 0];
43     i = 0;
44     while i < 6
45         i = i + 1;
46         l = sqrt((OQ(1,i) - P(1,i))^2 + (OQ(2,i) - P(2,i))^2 + (OQ(3,i) - P(3,i))^2);
47         lengths(i) = l;
48     end
49
50     lengths

```

Figura 101: Codice Matlab per cinematica inversa della piattaforma di Stewart

8.1.2 Codice per cinematica inversa del sistema completo dell'ottante sinistro

```
DATI

1  %Coordinate dei tre centri rispetto a sistema di riferimento centrato nella base superiore
2  c1=[-13.79 -628.923 328.732]';
3  c2=[-71.18 -516.956 380.896]';
4  c3=[-13.753 -574.246 383.795]';
5  s12=c2-c1;
6  s13=c3-c1;
7  prodvett_s=cross(s12,s13)
8  normal_s=prodvett_s/norm(prodvett_s);
9  e1=s12/norm(s12);
10 e2=cross(normal_s,e1);
11 MatRot_s=[e1 e2 normal_s]
12
13 % Giunti inferiori delle gambe nel sistema di riferimento della base inferiore
14 B1=[-49.834,-41.765,-10.52+11]';
15 B2=[-11.327,-63.988,-10.504+11]';
16 B3=[61.058, -22.228,-10.654+11]';
17 B4=[61.06,22.233,-10.803+11]';
18 B5=[-11.3,64.009,-10.898+11]';
19 B6=[-49.825,41.784,-10.779+11]';
20
21 B = [B1 B2 B3 B4 B5 B6];
22
23 % Giunti superiori delle gambe nel sistema di rif. della base superiore
24 P1=[-58.708,-21.383,-11.171+11]';
25 P2=[10.875,-61.556,-10.94+11]';
26 P3=[47.912,-40.187,-10.888+11]';
27 P4=[47.907,40.162,-11.017+11]';
28 P5=[10.873,61.536,-11.135+11]';
29 P6=[-58.704,21.364,-11.243+11]';
30
31 P = [P1 P2 P3 P4 P5 P6];
32

INPUT

33 % Coordinate dei tre centri nel sistema di riferimento base inferiore
34 C1=[91.357,-615.319,519.99]';
35 C2=[18.228,-511.764,569.791]';
36 C3=[83.194,-560.238,574.042]';
37

CALCOLI

38 S12=C2-C1;
39 S13=C3-C1;
40 prodvett_s=cross(S12,S13);
41 normal=prodvett_s/norm(prodvett_s);
42 E1=S12/norm(S12);
43 E2=cross(normal,E1);
44 MatRot=[E1 E2 normal]
45
```

```

46
47     deltaR=MatRot*MatRot_s'
48
49     %vettore centro cerchio 1 che parte dal centro della base superiore rispetto a
50     %coordinate base inferiore
51     c1r=deltaR*c1
52
53     %centro piastra superiore
54     C0=C1-c1r
55
56     %estremi superiori gambe Stewart
57     TopPoints = deltaR*P+C0
58
59     %estremi inferiori gambe Stewart
60     BottomPoints = B;
61
62     %calcolo lunghezza gambe
63     leg_lengths = [0 0 0 0 0 0];
64     i = 0;
65     while i < 6
66         i = i + 1;
67         d = sqrt((TopPoints(1,i) - BottomPoints(1,i))^2 + (TopPoints(2,i)-BottomPoints(2,i))^2 + (TopPoints(3,i) - Botto
68         leg_lengths(i) = d;
69     end
70
71     leg_lengths

```

Figura 102: Codice Matlab per cinematica inversa del sistema completo dell'ottante sinistro

8.2 Programma PLC

Di seguito il programma per PLC sviluppato con CrouzetSoft.

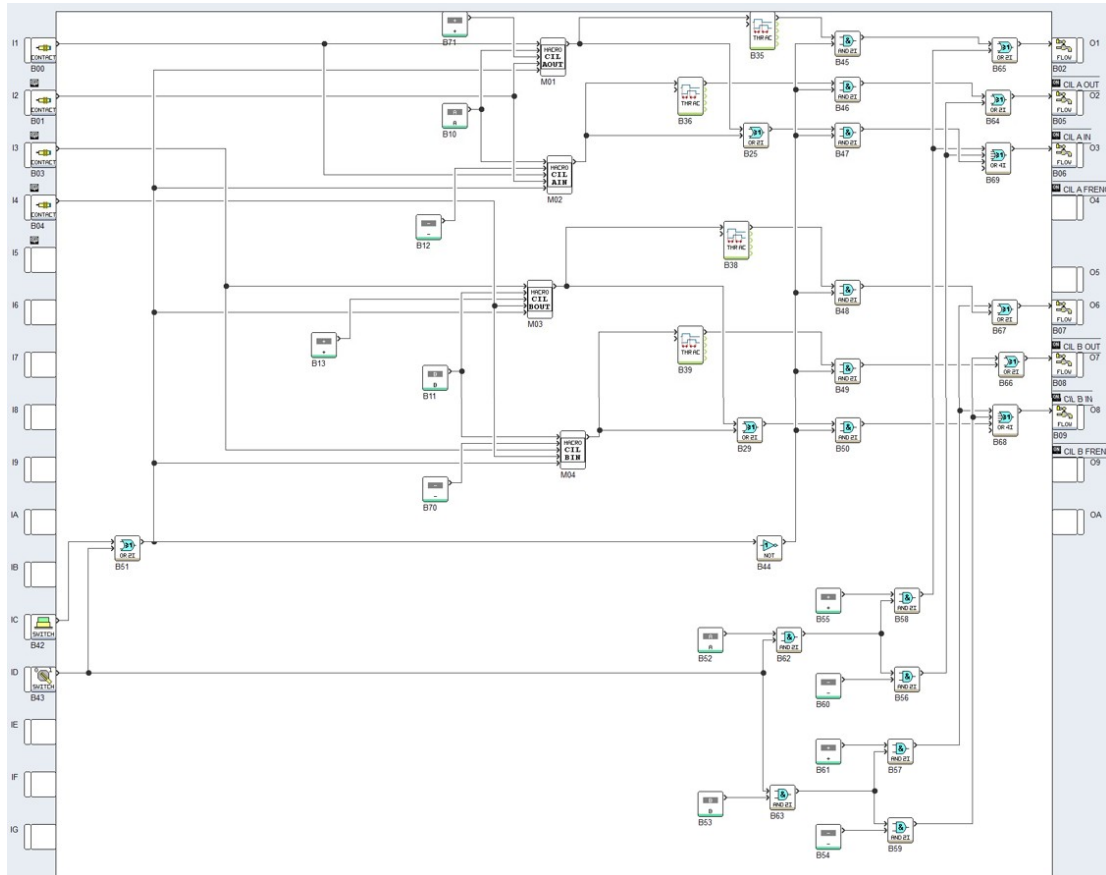


Figura 103: Programma PLC

Le Macro (es: MACRO CIL A OUT) del programma sono state fatte per semplificare graficamente il programma e renderlo più visibile.

Le due Macro per la fuoriuscita dei cilindri (MACRO CIL OUT) sono fatte all'interno come indicato in figura 104, dove c'è quella della fuoriuscita del cilindro dell'ottante sinistro.

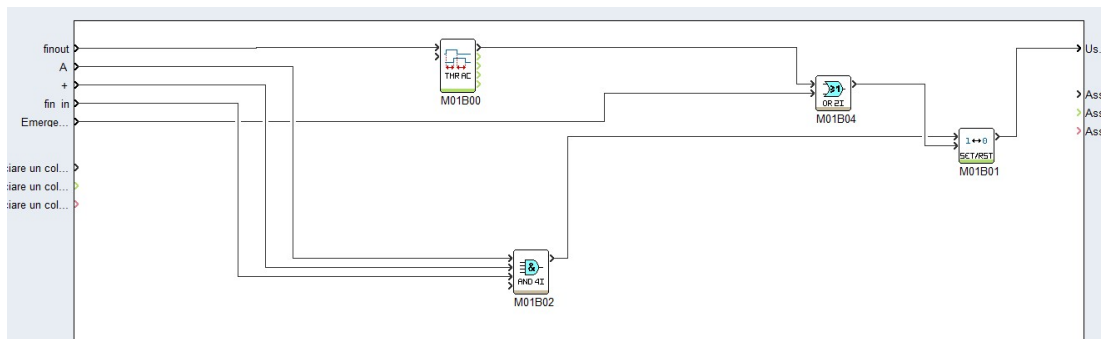


Figura 104: Macro cilindro A fuori

Le due Macro per il rientro dei cilindri (MACRO CIL IN) sono fatte all'interno come indicato in figura 105, dove c'è quella del rientro del cilindro dell'ottante sinistro.

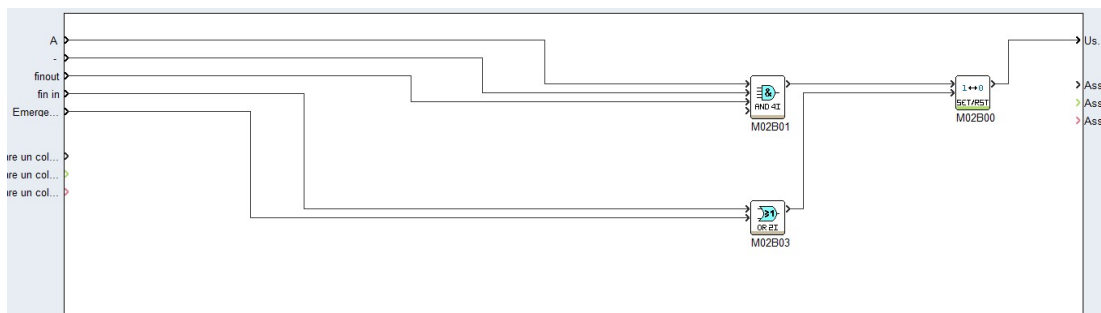


Figura 105: Macro cilindro A rientro

8.3 Tabelle risultati delle prove con CMM

8.3.1 Cinematica della piattaforma di Stewart

	D	leg_des	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	10-feb		0	0	8	0	0	6,5
2	10-feb		5,5	5,5	5,5	finecorsa	5,5	5,5
3	10-feb	finecorsa		0	5,5	finecorsa		0
4	10-feb		5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
5	10-feb		0	0	0	0	0	0
6	11-feb		-6,35	5,4	-2,875	-2,7	2,2	-3,15
7	11-feb		-6,35	0	-2,875	-2,7	-5,95	0,8
8	11-feb		0	0	0	0	0	0
9	11-feb		3,3814	2,8298	4,1117	3,2457	2,2814	3,6126
10	12-feb		0	0	0	0	0	0
11	12-feb		7,4890	0,1560	8,6461	8,1757	-0,3895	7,3205
12	12-feb		-5,3345	-0,7983	-2,5063	-2,4452	-3,2965	-3,8852
13	13-feb		0	0	0	0	0	0
14	13-feb		-4,0028	2,7258	-3,9859	3,4934	-4,1621	4,6428
15	13-feb		2,1789	0,1638	1,3554	5,0767	6,0174	4,2518
16	13-feb		4,7412	-0,7374	-1,8593	0,3502	3,3311	4,6188
17	16-feb		0	0	0	0	0	0
18	16-feb		6,75	0	0	7,9	0	0
19	16-feb		6,75	0	0	7,9	-6,6	0
20	17-feb		0	0	0	0	0	0
21	17-feb		6,75	0	0	7,9	0	0
22	17-feb		0	0	0	0	0	0
23	17-feb		6,75	0	0	7,9	0	0
24	17-feb		0	0	0	0	0	0
25	17-feb		6,75	0	0	7,9	0	0
26	18-feb		6,75	0	0	7,9	0	0
27	18-feb		0	0	0	0	0	0
28	18-feb		0	0	0	0	0	0
29	18-feb		0	0	0	0	0	0
30	18-feb		0	0	0	0	0	0
31	18-feb		0	0	0	0	6,3	0
32	18-feb		0	-6,55	0	0	0	0
33	18-feb		0	0	0	0	0	0
34	18-feb		0	0	0	0	6,3	0
35	19-feb		0	0	0	0	6,3	0
36	19-feb		0	0	0	0	0	0
37	19-feb		0	0	0	0	6,3	0
38	19-feb		-7,6	0	0	-7,7	4,9	3,8
39	19-feb		0	0	0	0	0	0
40	19-feb		0	0	0	0	6,3	0
41	20-feb		0	0	0	0	6,3	0
42	20-feb		4,7412	-0,7374	-1,8593	0,3502	3,3311	4,6188
43	20-feb		0	0	0	0	6,3	0
44	20-feb		4,7412	-0,7374	-1,8593	0,3502	3,3311	4,6188
45	20-feb		0	0	0	0	6,3	0
46	20-feb		4,7412	-0,7374	-1,8593	0,3502	3,3311	4,6188
47	20-feb		0	0	0	0	0	0
48	23-feb		0	0	0	0	0	0
49	23-feb		0	0	0	0	0,05	0
50	23-feb		0	0	0	0	0	0
51	23-feb		0	0	0	0	0,05	0
52	23-feb		0	0	0	0	0	0
53	23-feb		0	0	0	0	0,05	0
54	23-feb		0	0	0	0	0	0
55	23-feb		0	0	0	0	0	0,05
56	23-feb		0	0	0	0	0	0
57	23-feb		0	0	0	0	0	0,05
58	24-feb		0	0	0	0	0	0
59	24-feb		0,05	-0,05	0,05	-0,05	0,05	0,05
60	24-feb		0	0	0	0	0	0
61	24-feb		0,05	-0,05	0,05	-0,05	0,05	0,05

Figura 106: Valore della variazione di lunghezza che applico alle viti, secondo la scala graduata

leg_misure	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	180,414	180,519	188,674	181,137	181,376	187,351
2	185,925	186,008	186,074	190,323	186,836	186,303
3	171,453	180,491	186,130	190,374	181,357	180,808
4	185,899	186,005	186,100	186,616	186,841	186,296
5	180,403	180,484	180,602	181,103	181,333	180,784
6	174,016	186,061	177,822	178,433	183,599	177,717
7	173,983	180,587	177,777	178,394	175,402	181,601
8	180,416	180,543	180,634	181,129	181,341	180,818
9	183,748	183,335	184,708	184,360	183,584	184,355
10	180,404	180,519	180,620	181,129	181,323	180,794
11	187,958	180,634	189,271	189,279	180,954	188,146
12	175,078	179,699	178,091	178,675	178,102	176,940
13	180,415	180,526	180,614	181,117	181,354	180,810
14	176,368	183,267	176,620	184,656	177,176	185,453
15	182,542	180,622	181,908	186,145	187,337	185,017
16	185,148	179,752	178,748	181,449	184,674	185,400
17	180,399	180,501	180,605	181,132	181,347	180,809
18	187,216	180,518	180,597	189,064	181,331	180,785
19	187,222	180,519	180,590	189,073	174,706	180,787
20	180,382	180,496	180,581	181,103	181,360	180,796
21	187,223	180,541	180,583	189,030	181,343	180,791
22	180,407	180,510	180,596	181,088	181,342	180,781
23	187,183	180,507	180,588	189,067	181,360	180,789
24	180,412	180,513	180,576	181,083	181,327	180,774
25	187,218	180,529	180,596	189,055	181,347	180,783
26	187,233	180,518	180,576	189,039	181,347	180,791
27	180,416	180,512	180,598	181,098	181,334	180,776
28	180,416	180,509	180,588	181,089	181,336	180,781
29	180,418	180,510	180,588	181,089	181,336	180,783
30	180,415	180,506	180,587	181,086	181,349	180,792
31	180,436	180,530	180,619	181,133	187,675	180,805
32	180,443	173,948	180,589	181,113	181,380	180,813
33	180,447	180,486	180,590	181,098	181,347	180,802
34	180,443	180,494	180,603	181,118	187,682	180,812
35	180,432	180,488	180,620	181,139	187,677	180,812
36	180,438	180,480	180,603	181,116	181,340	180,802
37	180,436	180,492	180,619	181,132	187,675	180,807
38	172,735	180,540	180,667	173,426	186,323	184,653
39	180,389	180,473	180,565	181,088	181,363	180,816
40	180,380	180,489	180,614	181,140	187,691	180,817
41	180,358	180,466	180,590	181,110	187,663	180,795
42	185,108	179,743	178,698	181,438	184,643	185,380
43	180,379	180,502	180,595	181,111	187,667	180,778
44	185,109	179,717	178,741	181,420	184,644	185,369
45	180,377	180,507	180,598	181,081	187,638	180,790
46	185,106	179,717	178,716	181,403	184,655	185,378
47	180,409	180,480	180,569	181,106	181,352	180,785
48	180,398	180,464	180,567	181,095	181,358	180,781
49	180,421	180,478	180,561	181,084	181,402	180,793
50	180,400	180,465	180,566	181,095	181,332	180,784
51	180,409	180,467	180,562	181,091	181,394	180,793
52	180,414	180,479	180,569	181,089	181,348	180,786
53	180,398	180,469	180,581	181,106	181,390	180,777
54	180,414	180,477	180,570	181,094	181,345	180,789
55	180,410	180,474	180,574	181,101	181,349	180,837
56	180,431	180,486	180,561	181,082	181,346	180,808
57	180,415	180,478	180,577	181,102	181,349	180,839
58	180,395	180,475	180,609	181,090	181,321	180,774
59	180,408	180,433	180,630	181,046	181,408	180,827
60	180,366	180,497	180,585	181,070	181,309	180,774
61	180,418	180,432	180,640	181,053	181,382	180,815

Figura 107: Lunghezze delle gambe ottenuta in seguito a misure con CMM e all'utilizzo della cinematica inversa

	D_leg_mis	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	10-feb	0,011	0,035	8,072	0,034	0,043	6,568
2	10-feb	5,521	5,524	5,473	9,221	5,503	5,519
3	10-feb	-8,950	0,007	5,528	9,272	0,024	0,024
4	10-feb	5,496	5,521	5,498	5,514	5,508	5,512
5	10-feb						
6	11-feb	-6,400	5,518	-2,812	-2,696	2,258	-3,101
7	11-feb	-6,433	0,044	-2,857	-2,735	-5,939	0,783
8	11-feb						
9	11-feb	3,332	2,792	4,074	3,231	2,243	3,537
10	12-feb						
11	12-feb	7,554	0,115	8,650	8,151	-0,369	7,352
12	12-feb	-5,327	-0,819	-2,529	-2,454	-3,222	-3,854
13	13-feb						
14	13-feb	-4,047	2,741	-3,994	3,540	-4,178	4,643
15	13-feb	2,128	0,096	1,294	5,028	5,984	4,207
16	13-feb	4,734	-0,774	-1,866	0,332	3,320	4,590
17	16-feb						
18	16-feb	6,817	0,017	-0,008	7,932	-0,015	-0,023
19	16-feb	6,823	0,018	-0,015	7,941	-6,641	-0,022
20	17-feb						
21	17-feb	6,841	0,045	0,002	7,927	-0,017	-0,005
22	17-feb						
23	17-feb	6,777	-0,004	-0,008	7,980	0,018	0,007
24	17-feb						
25	17-feb	6,805	0,016	0,020	7,972	0,020	0,008
26	18-feb	6,817	0,005	-0,023	7,941	0,013	0,015
27	18-feb						
28	18-feb						
29	18-feb						
30	18-feb						
31	18-feb	0,021	0,024	0,032	0,047	6,327	0,013
32	18-feb	0,027	-6,558	0,002	0,026	0,031	0,021
33	18-feb						
34	18-feb	-0,004	0,008	0,012	0,020	6,334	0,010
35	19-feb	-0,006	0,008	0,018	0,024	6,337	0,010
36	19-feb						
37	19-feb	-0,003	0,012	0,016	0,016	6,334	0,005
38	19-feb	-7,704	0,060	0,065	-7,690	4,983	3,851
39	19-feb						
40	19-feb	-0,009	0,016	0,049	0,052	6,328	0,000
41	20-feb	-0,050	-0,013	0,021	0,004	6,311	0,010
42	20-feb	4,699	-0,736	-1,871	0,332	3,290	4,595
43	20-feb	-0,030	0,022	0,025	0,005	6,315	-0,006
44	20-feb	4,700	-0,762	-1,829	0,313	3,292	4,584
45	20-feb	-0,031	0,027	0,028	-0,025	6,286	0,005
46	20-feb	4,697	-0,763	-1,854	0,296	3,303	4,593
47	20-feb						
48	23-feb						
49	23-feb	0,024	0,014	-0,006	-0,011	0,044	0,012
50	23-feb						
51	23-feb	0,009	0,003	-0,004	-0,004	0,061	0,009
52	23-feb						
53	23-feb	-0,017	-0,010	0,013	0,017	0,043	-0,009
54	23-feb						
55	23-feb	-0,004	-0,003	0,004	0,007	0,004	0,048
56	23-feb						
57	23-feb	-0,016	-0,008	0,016	0,020	0,002	0,032
58	24-feb						
59	24-feb	0,013	-0,042	0,021	-0,044	0,087	0,054
60	24-feb						
61	24-feb	0,052	-0,065	0,055	-0,017	0,073	0,042

Figura 108: Variazione di lunghezze delle gambe (ottenute dalle misure e cinematica) tra una certa configurazione e la configurazione 0 più vicina cronologicamente

		leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	10-feb	0,011	0,035	0,072	0,034	0,043	0,068
2	10-feb	0,021	0,024	-0,028	/	0,003	0,019
3	10-feb	/	0,007	0,028	/	0,024	0,024
4	10-feb	-0,004	0,021	-0,002	0,014	0,008	0,012
5	10-feb						
6	11-feb	-0,050	0,118	0,063	0,004	0,058	0,049
7	11-feb	-0,083	0,044	0,018	-0,035	0,011	-0,017
8	11-feb						
9	11-feb	-0,050	-0,038	-0,038	-0,014	-0,039	-0,076
10	12-feb						
11	12-feb	0,065	-0,040	0,004	-0,025	0,020	0,032
12	12-feb	0,008	-0,021	-0,023	-0,008	0,075	0,031
13	13-feb						
14	13-feb	-0,044	0,015	-0,008	0,046	-0,016	0,000
15	13-feb	-0,051	-0,068	-0,061	-0,048	-0,034	-0,045
16	13-feb	-0,008	-0,037	-0,007	-0,018	-0,011	-0,029
17	16-feb						
18	16-feb	0,067	0,017	-0,008	0,032	-0,015	-0,023
19	16-feb	0,073	0,018	-0,015	0,041	-0,041	-0,022
20	17-feb						
21	17-feb	0,091	0,045	0,002	0,027	-0,017	-0,005
22	17-feb						
23	17-feb	0,027	-0,004	-0,008	0,080	0,018	0,007
24	17-feb						
25	17-feb	0,055	0,016	0,020	0,072	0,020	0,008
26	18-feb	0,067	0,005	-0,023	0,041	0,013	0,015
27	18-feb						
28	18-feb						
29	18-feb						
30	18-feb						
31	18-feb	0,021	0,024	0,032	0,047	0,027	0,013
32	18-feb	0,027	-0,008	0,002	0,026	0,031	0,021
33	18-feb						
34	18-feb	-0,004	0,008	0,012	0,020	0,034	0,010
35	19-feb	-0,006	0,008	0,018	0,024	0,037	0,010
36	19-feb						
37	19-feb	-0,003	0,012	0,016	0,016	0,034	0,005
38	19-feb	-0,104	0,060	0,065	0,010	0,083	0,051
39	19-feb						
40	19-feb	-0,009	0,016	0,049	0,052	0,028	0,000
41	20-feb	-0,050	-0,013	0,021	0,004	0,011	0,010
42	20-feb	-0,042	0,001	-0,012	-0,018	-0,041	-0,024
43	20-feb	-0,030	0,022	0,025	0,005	0,015	-0,006
44	20-feb	-0,041	-0,025	0,031	-0,037	-0,039	-0,034
45	20-feb	-0,031	0,027	0,028	-0,025	-0,014	0,005
46	20-feb	-0,044	-0,025	0,006	-0,054	-0,028	-0,026
47	20-feb						
48	23-feb						
49	23-feb	0,024	0,014	-0,006	-0,011	-0,006	0,012
50	23-feb						
51	23-feb	0,009	0,003	-0,004	-0,004	0,011	0,009
52	23-feb						
53	23-feb	-0,017	-0,010	0,013	0,017	-0,007	-0,009
54	23-feb						
55	23-feb	-0,004	-0,003	0,004	0,007	0,004	-0,002
56	23-feb						
57	23-feb	-0,016	-0,008	0,016	0,020	0,002	-0,018
58	24-feb						
59	24-feb	-0,037	0,008	-0,029	0,006	0,037	0,004
60	24-feb						
61	24-feb	0,002	-0,015	0,005	0,033	0,023	-0,008

Figura 109: Differenza tra variazione di lunghezza applicata manualmente alle viti (D-leg-des) e variazione di lunghezza ottenuta dalle misure (D-leg-mis)

8.3.2 Ripetibilità del sistema dell'ottante sinistro

		punto 1			punto 2			punto 3		
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
12-mar	1	-94,264	-427,09	631,585	-151,765	-404,798	559,364	-94,206	-461,958	562,199
12-mar	2	-94,271	-427,083	631,577	-151,763	-404,797	559,364	-94,211	-461,953	562,194
12-mar	3	-94,271	-427,084	631,577	-151,763	-404,798	559,365	-94,21	-461,955	562,194
12-mar	4	-94,555	-427,099	631,564	-152,038	-404,783	559,351	-94,512	-461,966	562,18
12-mar	5	-94,332	-427,085	631,558	-151,823	-404,791	559,346	-94,278	-461,953	562,17
12-mar	6	-94,631	-427,1	631,569	-152,108	-404,777	559,356	-94,589	-461,965	562,189
12-mar	7	-94,634	-427,098	631,568	-152,109	-404,777	559,356	-94,59	-461,965	562,188
12-mar	8	-94,479	-427,048	631,599	-151,965	-404,745	559,386	-94,43	-461,921	562,219
12-mar	9	-94,508	-427,05	631,598	-151,992	-404,743	559,386	-94,46	-461,921	562,219
12-mar	10	-94,54	-427,044	631,6	-152,024	-404,734	559,387	-94,497	-461,912	562,221
16-mar	11	-94,482	-427,05	631,569	-151,978	-404,732	559,357	-94,439	-461,914	562,187
16-mar	12	-94,738	-427,275	631,864	-152,219	-404,962	559,632	-94,695	-462,166	562,479
16-mar	13	-94,679	-427,265	631,874	-152,161	-404,958	559,642	-94,632	-462,157	562,491
16-mar	14	-94,731	-427,267	631,881	-152,208	-404,957	559,646	-94,683	-462,159	562,496
16-mar	15	-94,648	-427,265	631,865	-152,129	-404,961	559,632	-94,599	-462,156	562,48
16-mar	16	-94,643	-427,265	631,871	-152,123	-404,962	559,638	-94,593	-462,156	562,486
16-mar	17	-94,62	-427,265	631,858	-152,102	-404,961	559,627	-94,571	-462,156	562,472
16-mar	18	-94,51	-427,306	631,795	-151,999	-405,007	559,568	-94,457	-462,189	562,408
16-mar	19	-94,577	-427,291	631,826	-152,062	-404,989	559,596	-94,525	-462,177	562,441
16-mar	20	-94,536	-427,308	631,784	-152,025	-405,004	559,558	-94,487	-462,188	562,398
16-mar	21	-94,553	-427,307	631,803	-152,039	-405,005	559,573	-94,501	-462,191	562,413
16-mar	22	-94,486	-427,312	631,789	-151,975	-405,013	559,565	-94,433	-462,194	562,4
16-mar	23	-94,558	-427,31	631,8	-152,045	-405,007	559,571	-94,508	-462,195	562,409
16-mar	24	-94,918	-427,315	631,837	-152,379	-404,985	559,605	-94,875	-462,201	562,456

Figura 110: Coordinate dei punti 1, 2, 3 rispetto al sistema di riferimento con origine nel centro della base inferiore della piattaforma

8.3.3 Caratterizzazione del guscio dell'ottante sinistro

		intersezione assi 1 e 2			intersezione assi 1 e 3			intersezione assi 2 e 3		
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
12-mar	1	-358,284	-663,385	706,499	-357,798	-663,16	706,33	-359,05	-664,177	707,064
12-mar	2	-358,747	-663,943	706,812	-358,117	-663,45	706,589	-358,901	-664,034	706,975
12-mar	3	-358,68	-663,846	706,764	-358,549	-663,702	706,636	-358,57	-663,597	706,641
12-mar	4	-358,954	-663,567	706,744	-359,412	-663,91	706,845	-358,798	-663,369	706,551
12-mar	5	-359,143	-664,199	706,976	-358,537	-663,647	706,757	-358,968	-663,923	706,912
12-mar	6	-359,475	-663,839	706,846	-359,811	-664,078	706,924	-359,308	-663,64	706,671
12-mar	7	-359,53	-663,914	706,877	-359,95	-664,205	706,978	-359,287	-663,634	706,639
12-mar	8	-359,212	-663,961	707,059	-359,754	-664,282	707,175	-358,684	-663,341	706,595
12-mar	9	-359,101	-663,769	706,889	-359,921	-664,391	707,111	-358,846	-663,497	706,59
12-mar	10	-359,125	-663,677	706,85	-359,885	-664,28	707,1	-358,981	-663,587	706,668
16-mar	11	-359,159	-663,799	706,821	-359,33	-663,91	706,852	-359,035	-663,643	706,699
16-mar	12	-359,766	-664,177	707,2	-360,787	-664,892	707,423	-359,224	-663,519	706,638
16-mar	13	-359,674	-664,203	707,292	-360,654	-664,845	707,502	-358,97	-663,362	706,625
16-mar	14	-360,015	-664,459	707,393	-360,85	-664,964	707,554	-359,248	-663,533	706,699
16-mar	15	-359,357	-663,826	707,221	-360,274	-664,535	707,392	-359,153	-663,509	706,885
16-mar	16	-359,347	-663,846	707,238	-360,379	-664,669	707,429	-359,217	-663,597	706,926
16-mar	17	-359,279	-663,821	707,25	-360,28	-664,561	707,465	-358,907	-663,346	706,802
16-mar	18	-359,169	-663,954	707,223	-360,074	-664,699	707,398	-359,149	-663,848	707,018
16-mar	19	-359,2	-663,832	707,195	-360,071	-664,546	707,396	-359,161	-663,754	707,008
16-mar	20	-359,057	-663,818	707,092	-359,649	-664,341	707,196	-359,2	-663,908	707,055
16-mar	21	-359,189	-663,944	707,153	-359,827	-664,473	707,253	-359,201	-663,867	707,009
16-mar	22	-359,442	-664,232	707,312	-360,019	-664,678	707,406	-359,321	-664,02	707,095
16-mar	23	-359,183	-663,87	707,108	-359,598	-664,232	707,167	-359,265	-663,894	707,06
16-mar	24	-360,506	-664,607	707,355	-360,929	-664,866	707,408	-360,139	-664,124	706,998

Figura 111: Coordinate punti di intersezione tra i tre assi dei tre fori rispetto al sistema di riferimento con origine nel centro della base inferiore della piattaforma

8.3.4 Cinematica del sistema dell'ottante sinistro

D_leg_des	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	-4,5	4,5	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	-2	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	-2,5
7	0	0	0	0	0	0
8	-1,5	0	3	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	6,3	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	6,3	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	6,3	0	0	0	0

Figura 112: Valore della variazione di lunghezza che applico alle viti

leg_misur	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1	180,458	180,828	180,887	181,198	181,216	180,596
2	180,446	180,831	176,421	185,688	181,234	180,545
3	180,460	180,836	180,914	181,173	181,218	180,598
4	182,482	180,806	180,946	181,218	179,218	180,591
5	180,469	180,813	180,915	181,169	181,189	180,575
6	180,538	180,857	180,944	181,229	181,269	178,164
7	180,491	180,832	180,913	181,186	181,244	180,665
8	178,928	180,818	183,978	181,211	181,208	180,636
9	180,792	181,238	181,342	181,698	181,682	180,928
10	180,435	187,268	180,965	181,182	181,252	180,646
11	180,458	180,882	181,000	181,191	181,230	180,622
12	180,423	187,292	181,004	181,222	181,256	180,628
13	180,458	180,835	180,977	181,170	181,211	180,620
14	180,410	187,277	181,026	181,259	181,280	180,637

Figura 113: Lunghezze delle gambe ottenuta in seguito a misure con CMM e all'utilizzo della cinematica inversa

D_leg_mis	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1						
2	-0,013	0,003	-4,466	4,490	0,018	-0,051
3						
4	2,022	-0,031	0,032	0,045	-2,000	-0,007
5						
6	0,069	0,043	0,030	0,060	0,080	-2,411
7						
8	-1,563	-0,015	3,065	0,025	-0,036	-0,029
9						
10	-0,357	6,030	-0,378	-0,516	-0,429	-0,282
11						
12	-0,036	6,411	0,005	0,031	0,027	0,006
13						
14	-0,048	6,442	0,049	0,089	0,069	0,018

Figura 114: Variazione di lunghezze delle gambe (ottenute dalle misure e cinematica) tra una certa configurazione e la configurazione 0 precedente

	leg1 [mm]	leg2 [mm]	leg3 [mm]	leg4 [mm]	leg5 [mm]	leg6 [mm]
1						
2	-0,013	0,003	0,034	-0,010	0,018	-0,051
3						
4	0,022	-0,031	0,032	0,045	0,000	-0,007
5						
6	0,069	0,043	0,030	0,060	0,080	0,089
7						
8	-0,063	-0,015	0,065	0,025	-0,036	-0,029
9						
10	-0,357	-0,270	-0,378	-0,516	-0,429	-0,282
11						
12	-0,036	0,111	0,005	0,031	0,027	0,006
13						
14	-0,048	0,142	0,049	0,089	0,069	0,018

Figura 115: Differenza tra variazione di lunghezza applicata manualmente alle viti (D-leg-des) e variazione di lunghezza ottenuta dalle misure (D-leg-mis)